

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LOS PROCESOS DE VAPOR INVOLUCRADOS EN
UN TRAPICHE PANELERO**

YEFERSON GALLARDO GARCÍA

PROYECTO DE GRADO

DIRECTOR:

JUAN CARLOS CASTILLO HERRERA

INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.2. JUSTIFICACIÓN	10
1.3. OBJETIVOS.....	12
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. APOORTE AL CAMPO DEL CONOCIMIENTO.....	12
1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	13
2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA	15
2.1. REVISION BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.1 Aspectos legales.....	15
2.1.2. Panela.....	16
2.1.3. Análisis energético	17
2.2 PROCESOS DE LA PRODUCCIÓN PANELERA	18
2.2.1 Apronte.....	19
2.2.1 Molienda	19
2.2.2 Limpieza.....	19
2.2.3 Clarificación	19
2.2.4 Evaporación.....	20
2.2.5 Concentración (Tachos)	20
2.2.6 Punteo y batido.....	20

2.2.7 Moldeo	20
2.2.8 Enfriamiento	21
2.2.9 Empaque y almacenamiento.....	21
2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA QUE DEMANDAN VAPOR.....	21
3. ANÁLISIS ENERGÉTICO TEÓRICO.....	27
3.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO	27
3.1.1 Principio de conservación de la masa	27
3.1.2 Balance de energía.....	29
3.1.3 Cálculo de la eficiencia.....	30
3.2 PROCEDIMIENTO REALIZADO	34
3.2.1 Extracción y limpieza	35
3.2.2. Generación de vapor	39
3.2.3. Cálculo de la tasa de transferencia de calor en los intercambiadores.....	41
3.2.4 Cálculos empleando el software EES	49
3.2.5 Comparación de los resultados con la literatura	53
3.2.6 Identificación de las mejoras, sugerencias o recomendaciones	54
4. CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXO	62

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Flujo del proceso productivo de la caña	18
Figura 2. Esquema general del proceso productivo de la panela	26
Figura 3. Intercambiador abierto a la atmosfera.....	28
Figura 4. Proceso de extracción y limpieza	35
Figura 5. Molienda y macerado.....	35
Figura 6. Proceso de limpieza	38
Figura 7. Etapas donde se evidencia consumo de vapor	42
Figura 8. Proceso de calentamiento de jugos.....	42
Figura 9. Proceso de evaporación	45
Figura 10. Proceso de tachos	47
Figura 11. Esquema general identificando los puntos a analizar.....	52

RESUMEN

La producción de panela empleando vapor es una alternativa eficiente que procura generar un cambio radical en la producción de panela y no solamente obtener cambios momentáneos e inversiones de dinero constantes, las cuales en poco tiempo se vuelven obsoletas o se dejan de implementar; por el contrario, debe existir un compromiso de mejora continua e implantar controles, monitoreos y capacitaciones enfocadas en aumentar su eficiencia, su productividad y su rentabilidad; para poder competir en el mercado nacional e internacional.

El objetivo principal del trabajo es la realización de un análisis energético teórico, implementando la primera ley de la termodinámica, haciendo énfasis en un balance de masa, de energía y determinando la eficiencia de los procesos o equipos que emplean vapor y los cuales intervienen en la producción de panela en un trapiche de mediana escala, el cual se encontraría situado en la región del Valle del Cauca.

Mediante la implementación de la primera ley y el software EES (Engineering Equation Solver), se identifican los procesos en los cuales se evidencia un mayor consumo energético al interior de la frontera comprendida entre la molienda de caña y la obtención de panela, permitiendo contrastar la información obtenida con la literatura; de este modo se podrán generar estrategias o recomendaciones orientadas a disminuir el consumo energético, teniendo en cuenta diversos aspectos como los técnicos, operacionales, entre otros.

INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología permite que los procesos industriales sean más factibles y confiables para quienes invierten en sus desarrollos. Con la implementación de esta, se pretende mejorar los diferentes procesos, trayendo como consecuencia competitividad y desarrollo tanto para la empresa como para la región donde se pongan en práctica. La producción de panela se ha transformado en una de las fuentes de ingreso más significativas en el territorio nacional, aportando en el desarrollo económico y social, no obstante, requiere la implementación de tecnología para agilizar y mejorar sus procesos, debido a que la panela se ha convertido en uno de los insumos indispensables en la canasta familiar, haciendo de Colombia el segundo productor a nivel mundial, y uno de los principales consumidores [1].

La elaboración y obtención de la panela ha sido una de las actividades más artesanales que han desarrollado los campesinos en el territorio nacional, sin embargo, con la evolución tecnológica se han desarrollado nuevos métodos de obtención y aprovechamiento de la materia prima, al igual que los insumos necesarios para la obtención de la panela [2]. Una de las nuevas tecnologías emergentes es la implementación del bagazo de la caña como combustible para la producción de vapor empleando un generador de vapor, haciendo uso del sistema de calentamiento indirecto [3]. Se toma como referencia el poder calorífico superior del bagazo de la caña, con un 30% de humedad de 12970 kJ/kg [4].

En el ciclo de elaboración de la panela, el vapor se aprovecha en los diferentes procesos, de igual forma, se utiliza la transferencia de calor, para obtener con la menor pérdida de energía posible, los grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) que se necesitan para cada término de la panela en el proceso de producción.

La implementación del vapor en la producción de la panela se ha establecido como una alternativa de producción de energía eficiente, económica y amigable con el ambiente, en comparación con los métodos convencionales, tales como el uso de llantas o leña según indica Ubaque G. [20]; los cuales al realizar la combustión generan mayores emisiones de efecto invernadero, es por esta razón que se busca aprovechar al máximo el vapor, e intentar disminuir el consumo energético. Esto se logra promoviendo un uso eficiente y

racional de la energía, así como implementando tecnología enfocada en aumentar la eficiencia de los equipos, este es un compromiso que involucra todo el personal del plantel de la empresa y sus resultados pueden ser evaluados, si previamente se ha establecido una línea base o con los registros históricos de los niveles energéticos del ciclo [5]. Por otro lado, se busca agilizar y reducir el tiempo de análisis en los procedimientos necesarios para un diagnostico pertinente en los sistemas de vapor, realizando un balance energético, el cual involucra un balance de masa, un balance de energía y el cálculo de la eficiencia tanto en los procesos como en los dispositivos a analizar.

El presente trabajo presenta un análisis termodinámico teórico de elementos típicos y más importantes que intervienen en un trapiche que implemente vapor en los procesos para la obtención de la panela, para esto se asume un trapiche estándar a mediana escala, en donde se procesa alrededor de 10 t de caña por día, valor tomado a partir de la información de aprovechamiento de caña, el cual oscila entre 8 % y 10 % [6], lo que da como resultado una producción estimada de 125 kg de panela por hora, en una jornada de 8 horas; por consiguiente se habla de un trapiche de producción a mediana escala según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Social [7]; acogiendo principalmente la implementación de la primera ley de la termodinámica [8]. Adicionalmente, acoger normas nacionales e internacionales, como la norma ISO 50001 [9], las cuales podrán ser aplicadas en un trapiche panelero.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El capítulo presenta la temática que se está abordando, la importancia del tema tratado, el alcance del proyecto, la justificación, los objetivos específicos y el general, además se contempla la estructura que presenta el documento.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de vapor corresponden a la unión de diferentes dispositivos como generadores de vapor, intercambiadores de calor entre otros, los cuales, son necesarios para la realización de procesos tales como generación, distribución y uso del vapor [10], [11]. Mediante la primera ley de la termodinámica, la cual enuncia el principio de conservación de la energía, es decir, la transferencia neta de energía es igual al cambio en la energía del sistema, se realiza el análisis energético de cada uno de los elementos que participan en los procesos de producción de la panela [12], realizando un balance de masa, energía y determinando la eficiencia; empleando estas herramientas principalmente en los procesos de los sistemas de vapor, se identifican los procesos que demandan mayor energía e igualmente se evalúan los principales parámetros de funcionamiento [13].

Los sistemas de gestión energética pueden ser proyectados a corto, mediano o largo plazo y son propios de cada empresa, en el ámbito de la toma de decisiones. Para aplicar Sistemas de Gestión Energética (SGE), se deben indagar previamente y recolectar la información energética pertinente haciendo uso de la primera ley de la termodinámica y teniendo siempre presente la relación entre costo-beneficio, necesidad y operación. En la actualidad los sistemas de vapor implementados en la industria panelera aportan gran productividad a la región [14], sin embargo, estos pueden presentar bajas eficiencias, debido a múltiples factores tales como; la poca innovación tecnológica, la falta de regulación y automatización o la falta de un balance energético que ayude en la medición del consumo energético. Además, es necesario considerar aspectos tecnológicos, y realizar una correcta selección de componentes, los cuales pueden contribuir a que los sistemas sean ineficientes [15], [16].

Por tanto, es de vital importancia realizar un análisis energético de los componentes de un trapiche panelero de mediana escala que utilice vapor en su línea de producción, teniendo en cuenta entidades como la Federación Nacional de Productores de Panela (FEDEPANELA), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) [15], entre otros los cuales involucran la problemática planteada.

Debido al compromiso de preservar el medio ambiente y de reducir las emisiones contaminantes descargadas a la atmósfera, es necesario implementar estrategias de ahorro energético. Por este motivo es primordial realizar un análisis teórico en aspectos como el flujo de masa, el consumo de energía y la eficiencia que presentan los componentes que intervienen en la obtención de la panela en un trapiche, el cual use vapor para los procesos de producción y que procese alrededor de 10 t de caña al día, el cual corresponde a un valor típico de un trapiche de mediana escala, según los indicadores que presenta la literatura [7]. Se tendrán en cuenta inicialmente los procesos de clarificación, evaporación, tachos y el calentamiento de agua de macerado, en los cuales se evidencia la implementación de vapor.

La clarificación tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión, sustancias coloidales y colorantes presentes en los jugos; las concentraciones de grados Brix típicas en esta etapa oscilan entre 15 °Bx y 19 °Bx. En la evaporación básicamente se extrae el agua presente en el jugo de caña, eliminando cerca del 90 % presente y aumentando la concentración hasta llegar a 60 °Bx y finalmente en la etapa de los tachos se termina de remover el agua restante del jugo, además se alcanza el valor necesario para la obtención de la panela, este corresponde alrededor de 93 °Bx [17].

Se pretende identificar los componentes con mayor consumo o en los cuales se evidencie un desperdicio de energía, de esta forma enfocar estrategias llamadas de “gestión energética” hacia un menor consumo energético [18]. Lo anterior con el fin de encontrar una solución a las pérdidas que en la actualidad están relacionados con los sistemas de vapor de un trapiche panelero y poder extrapolar el análisis, a las diferentes disposiciones de equipos en los trapiches colombianos. En la investigación se pretende dar respuesta al siguiente interrogante ¿Cómo el análisis energético de los equipos y procesos que intervienen en la producción de panela en un trapiche que implemente una línea de vapor permite encontrar las mayores pérdidas de energía?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La producción de panela es una de las principales actividades agrícolas desarrolladas en el territorio nacional según FEDEPANELA, por tal motivo es vital que los productores de este insumo aprovechen al máximo su materia prima, ya que se han evidenciado que la producción de esta se realiza de manera muy artesanal [14], lo que trae para el productor poca competitividad en el mercado. Se han evidenciado una serie de déficits en estudios pertinentes, los cuales se centran en la pérdida de extracción de jugo, en la limpieza y clarificación, condiciones precarias de calidad, empaque y presentación; uno de las principales falencias que se han evidenciado a lo largo de su evolución es la baja eficiencia energética en el sistema de vapor [15], es en este último ítem es donde principalmente se centra el trabajo investigativo, en identificar los sub-procesos y equipos que presentan un mayor consumo energético, implementando un balance de masa, energía y calculando la eficiencia.

La fabricación de panela a lo largo de la historia no ha tenido muchos cambios, y la evolución de los trapiches en los que se produce no ha variado significativamente en algunas zonas del país, como lo es el caso del departamento de Cundinamarca, que, a pesar de ser el segundo territorio nacional con mayor área sembrada de caña, es uno de los departamentos con mayor atraso tecnológico, con un aprovechamiento medio por hectárea de caña del 25% menos que el promedio nacional [15].

Según la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC), la población campesina posee gran facilidad para implementar algunos de los desarrollos tecnológicos que se ofrecen en torno a la producción panelera, pero estos a su vez se tornan difíciles debido a que requiere capacitarse y entender el funcionamiento de los nuevos sistemas, de un estudio previo, de cumplir con normas nacionales e internacionales, normas de sanidad, entre otros, lo que implica que los productores de panela realicen una inversión inicial grande en diversos aspectos, además de no brindar el acompañamiento técnico necesario [15].

El correcto uso de las instalaciones y cada uno de los componentes contribuirá a que la producción de la panela mejore cada día más, comprometidos con la mejora continua, la innovación y la implementación tecnológica, se busca obtener un consumo energético

balanceado, logrando así una estabilidad y proporcionando de esta manera una "eficiencia de equilibrio", que consiste en garantizar que no exista una deficiencia de combustible y no se logre la producción estimada [3].

Para poder implementar la tecnología de vapor en un trapiche es necesario un acompañamiento y monitoreo constante tanto de la persona o empresa que implementa la tecnología como del que la suministra, ya que de esta manera aquel que pone en práctica es quien debe aprender a monitorear y controlar las variables que intervienen principalmente en la generación de vapor y así asegurar el máximo aprovechamiento, dejando en evidencia que no basta con tener una óptima tecnología instalada y no tener conocimiento claro de su funcionamiento, de su mantenimiento; la falta de conocimiento es un factor crucial que hace que todo el conjunto posea una baja eficiencia energética y no se aproveche la energía presente en el vapor.

La realización del proyecto obedece a la necesidad de reconocer los componentes y procesos que demandan mayor consumo energético entorno a un trapiche panelero, la creciente demanda energética hace que las empresas busquen fuentes de energía alternas o empleen estrategias encaminada a disminuir el consumo energético, por consiguiente es un aspecto importante el realizar un análisis energético con la finalidad de identificar plenamente la demanda energética de los componentes o procesos, para mejorar la competitividad e implementar un correcto desarrollo tecnológico al interior de la empresa.

El trabajo propone un análisis energético al interior de la frontera, la cual está establecida desde la molienda, hasta la obtención de la panela; con el fin de identificar en que puntos se es posible implementar estrategias de ahorro energético ya que esto ayudara a reducir costos en la producción, evitara un sobre costo en materia energética, además se disminuirán las emisiones de gases nocivos para la salud y el medio ambiente; sin embargo para poder desarrollar este trabajo, es necesario suponer una producción aproximada de 125 kg de panela por hora, valor tomado a partir del aprovechamiento de la caña, el cual oscila entre el 8 % y 10 %, partiendo de una jornada laboral de 8 horas y procesando 10 t caña al día; siendo esto una cantidad que obedece a un trapiche de mediana escala según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Social [7].

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Realizar el análisis energético teórico de los procesos de vapor en un trapiche panelero de mediana escala.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar la frontera y los procesos que intervienen en la obtención de la panela en un trapiche panelero estándar.
- Realizar el análisis energético teórico de los procesos mediante la implementación de un modelo termodinámico en el software EES, desarrollando un balance de energía, un balance de masa y calculando la eficiencia energética de los componentes y procesos.
- Validar el modelo termodinámico desarrollado, realizando comparación directa con la literatura o con un trapiche que se asemeje a las características del proyecto.
- Generar recomendaciones en los procesos o equipos a partir de la información obtenida.

1.4. APOORTE AL CAMPO DEL CONOCIMIENTO

La realización del presente trabajo es de carácter teórico y pretende abarcar los procesos y equipos que generalmente están involucrados en el proceso productivo de panela en un trapiche. Se procura realizar una revisión bibliográfica principalmente en el ámbito energético y entorno a la producción de panela; en este punto se tendrán en cuenta estudios de carácter investigativo tales como artículos, tesis, normas nacionales e internacionales, que den un aporte significativo al proyecto.

Con la implementación de un análisis energético centrándose principalmente en los aspectos de balance de energía, balance de masa y calculando la eficiencia, se identifican los procesos o componentes al interior de la frontera en los cuales se evidencia mayor demanda energética en la producción de panela; posteriormente se contrasta el desarrollo del modelo matemático empleado en el software EES con la primera parte del trabajo investigativo que consistía en la recolección de información, para así poder sugerir o recomendar estrategias

de ahorro encaminadas a reducir la demanda del perfil energético. Asimismo, este servirá de gran apoyo para quienes diseñan o proponen una disposición de un trapiche, ya que al tener identificados los componentes de un trapiche de mediana escala, en los cuales se presentan los mayores consumos energéticos, se les facilita enfocarse en mejorar aquellos aspectos con la finalidad de aumentar su eficiencia y mejorar sus procesos. Al mismo tiempo este servirá para los productores de panela, debido a que quedará plasmado los aspectos más relevantes que deben tener en cuenta a la hora de operación de un trapiche panelero, para así poder aumentar su producción y sus ingresos, no obstante, cumpliendo con todos los requerimientos legales tanto nacionales como internacionales, para su respectiva comercialización.

El presente trabajo podrá ser implementado a un trapiche en específico, siempre y cuando cumpla con las características con las que se desarrolla el trabajo; asimismo servirá de base para futuros trabajos relacionados con la implementación de un análisis energético. Además, puede servir como punto de referencias para entidades como FEDEPANELA, el IICA, o cualquier otra corporación que este directamente relacionada con la producción de panela en un trapiche, organizaciones que tengan planeado, o que estén desarrollando tecnologías a base de vapor, todo esto con el fin proporcionar un conglomerado de los aspectos más relevantes que puedan aumentar la eficiencia de sus procesos y/o componentes.

1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento cuenta con cuatro capítulos los cuales están distribuidos de manera secuencial, con el fin de que el lector conozca el alcance, el aporte, el tipo de trabajo y el desarrollo que se realiza respecto al proyecto; la manera en que se encuentran distribuidos los capítulos es la siguiente:

El primer capítulo es introductorio, presenta la temática que se está abordando, el alcance del proyecto, el tipo de tecnología en torno a la cual se desenvuelve la investigación y la justificación, además se plantean los objetivos general y específicos a cumplir durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En el segundo capítulo se describen los procesos en la producción panelera, se presenta la revisión bibliográfica referente al proyecto, permitiendo así ordenar y citar los estudios más relevantes que se han hecho alrededor de la problemática planteada, aportando y sustentando teóricamente la temática del proyecto; igualmente se desarrolla el primer objetivo específico, el cual se centra en identificar plenamente los subprocesos que intervienen en el proceso productivo de un trapiche panelero, para esto se plantea una frontera definida desde el proceso de molienda de la caña, hasta la obtención de la panela, teniendo en cuenta únicamente los procesos en los cuales se implemente vapor como fuente energética.

En el tercer capítulo se desarrollará el segundo y tercer objetivo específico del proyecto, al iniciar este se implementará un análisis energético, mediante la primera ley de la termodinámica, permitiendo determinar un perfil del consumo energético del proceso productivo de la panela, proporcionando así un consumo estimado de cada uno de los componentes involucrados en la producción. Al cierre de este se identifican y priorizaran las mejoras, sugerencias o recomendaciones, de acuerdo con lo que se ha evidenciado en el desarrollo del proyecto, permitiendo así establecer líneas de acción que podrán ser implantadas bajo condiciones de operación similares a las que se desarrolló el proyecto; al finalizar este capítulo se darán por cumplidos la totalidad de los objetivos específicos.

En el cuarto y último capítulo se encontrarán las conclusiones con las que el investigador culmina el proyecto.

2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA

En esta sección se describen los procesos típicos en la producción panelera, presenta una revisión bibliográfica referente al proyecto, asimismo se desarrolla el primer objetivo específico.

2.1. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Aspectos legales.

El Ministerio de la Protección Social mediante la resolución número 2546 de 2006 [19], especifica los requisitos sanitarios que debe cumplir la producción y comercialización de la panela en el territorio nacional; la panela debe cumplir unas características tanto en su composición como en su presentación, todos estos parámetros establecidos dentro de un rango, además dicha resolución especifica las sustancias pueden usarse para la elaboración y cuales están rotundamente prohibidas.

Esta entidad regula y supervisa las instalaciones de los trapiches, no obstante dicta todos los requerimientos legales que este debe cumplir para poder certificarse y obtener su registro sanitario; el personal que manipula la materia prima y elabora la panela debe contar con registro de manipulación de alimentos vigentes, emplear los elementos de protección personal adecuados y tener conocimiento de inocuidad en los alimentos; sin dejar de un lado todo lo relacionado con el proceso productivo de la panela. Esta entidad, está en la potestad de hacer auditorias en los trapiches y dictaminar sanciones si no cumplen con los requerimientos preestablecidos.

Por otra parte, Ubaque G. [20], da a conocer las 6 condiciones generales que deben cumplir los trapiches paneleros para poder funcionar y elaborar panela:

A. Estar ubicados en lugares aislados de cualquier foco de insalubridad; sus alrededores se mantendrán limpios, libres de acumulación de basuras, de estancamientos de agua y su funcionamiento no deberá ocasionar molestias a la comunidad.

- B. Estar separados de cualquier tipo de vivienda y no podrán utilizarse como dormitorio.
- C. Disponer de agua de fácil higienización y con servicios sanitarios para los operarios.
- D. No mantener sustancias peligrosas, tales como plaguicidas y tóxicos dentro de área de elaboración y almacenamiento de la panela.
- E. Disponer de un sistema de limpieza y filtración de los jugos de caña.
- F. Contar con un área de almacenamiento del producto terminado la cual debe presentar condiciones sanitarias y de ventilaciones óptimas y estibas para almacenamiento de la panela.

En la actualidad la resolución 779 de 2006 [21], reúne todas las condiciones de sanidad que deben cumplir los trapiches, asimismo las condiciones generales de la panela, sus requisitos y prohibiciones.

En el ámbito de la normatividad ambiental, se estima que Colombia genera alrededor de 511.000 toneladas de carbono a la atmosfera producto de la implementación de combustibles adicionales al bagazo como la leña, carbón, llantas usadas, entre otros; ante esta situación entidades como la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Panela (CIMPA), desarrollan alternativas tecnológicas que permitan reducir el consumo de combustibles, lo que implica una reducción en el ámbito de daño ambiental. Igualmente existen programas de reducción de emisiones de carbono en la industria panelera enfocada en disminuir el impacto ambiental, paralelo a este existe un programa de incentivos para la adopción de tecnologías limpias con la finalidad de tecnificar y mejorar progresivamente los trapiches y a su vez incorporar las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) [22].

2.1.2. Panela.

Según Caballero Y. [23] "la producción de panel a base de vapor es una nueva tecnología que puede ser empleada en trapiches los cuales tienen una producción que oscila entre 30 kg y 1000 kg de panela por hora, según lo permitido por el gobierno nacional"; para el desarrollo del presente trabajo se asumió una producción aproximadamente de 125 kg de

panela por hora, este valor está dentro de lo permitido por la ley dentro del territorio nacional.

El ministerio de agricultura y desarrollo rural describe el punto adecuado que la panela debe poseer al momento de terminar su producción, el cual depende principalmente de la concentración de sólidos solubles (grados Brix) y la pureza (contenido de sacarosa con relación al contenido de grados Brix) de las mieles; según esta entidad una panela de excelente calidad se obtiene cuando su alcanza un porcentaje de sólidos solubles entre 93 °Bx y 94 °Bx para panela moldeada individualmente en coco y entre 88 °Bx y 91 °Bx para la moldeada en gaveras [24].

Los autores Montoya y Giraldo [25], comparten las denominaciones típicas de la panela; adicionalmente, comentan que sus tres presentaciones comerciales son: panela redonda, panela cuadrada y panela pulverizada; esta por lo general viene en presentaciones de 500 g y 1000 g, no obstante, también se encuentran otras presentaciones en el mercado como lo son 750 g, 800 g y 900 g. Todo esto dependiendo del público que se desee impactar, desde tiendas de barrio, hasta cadenas de supermercados. Es importante destacar, que cada una de las modalidades de la presentación debe cumplir con los requerimientos impuestos por el Icontec, el Ministerio de Protección Social, el Ministerio de Salud y demás autoridades competentes en cuestión de calidad.

2.1.3. Análisis energético

Según García A. [26], la gestión energética puede concebirse como un esfuerzo organizado y estructurado el cual involucra la participación de todo nivel jerárquico, para así poder conseguir la máxima eficiencia en la producción, suministro, conversión y utilización de energía, mejorando cada vez más los procesos.

Por lo tanto, la implementación de un análisis energético es una práctica que ayuda a minimizar el consumo energético, justificando de este modo la inversión inicial que trae consigo la implementación de esta, no obstante, el autor aclara que se pueden presentar algunas dificultades en aspectos como lo son la escasa especialización del personal técnico para una adecuada operación y la poca atención que presta la gerencia a este aspecto.

Por otro lado, Salgado A. [27], plantea que la implementación de un análisis energético en una empresa debe comenzar con la evaluación de las condiciones técnicas, operacionales y de eficiencia de cada uno de los equipos en que se evidencia una gran demanda energética. El autor es claro en que el análisis energético debe de contar con la participación de diversos factores que interviene en las condiciones ya antes mencionadas y además se debe implementar un mecanismo que contribuya a un control y monitoreo adecuado de todos los parámetros adoptados, debido a que si nada de esto se emplea solo se llevara a cabo unos ciclos de ahorro de carácter periódicos o momentáneos.

Como lo dejan en evidencia los dos autores mencionados, el objetivo de la gestión energética, es principalmente reducir el consumo energético y poder manifestar, que debe existir un compromiso de principio a fin por parte de todos los niveles de la empresa al momento de poner en práctica un SGE, de lo contrario se limitaran los resultados, ya que como lo menciona el segundo autor, internacionalmente se ha demostrado que al implementar una correcta gestión energética se puede llegar a reducir un costo de facturación de energía entre el 10 % y 25 %, esto dependiendo del grado de compromiso que se haya adquirido.

2.2 PROCESOS DE LA PRODUCCIÓN PANELERA

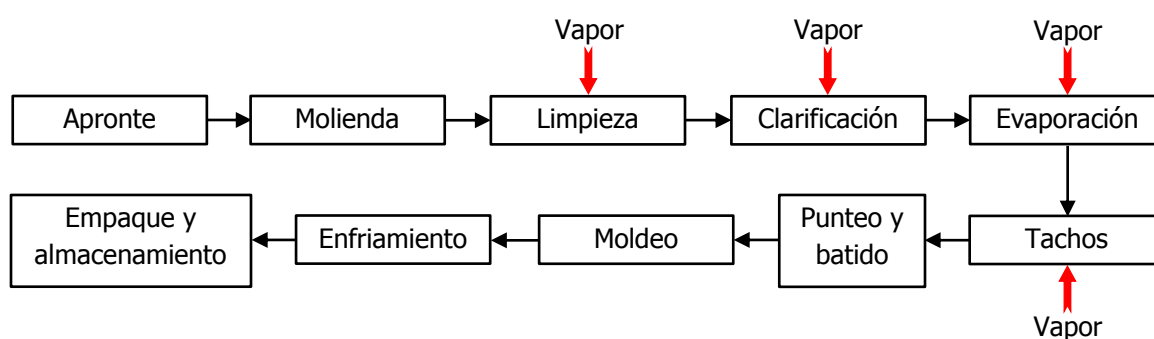


Figura 1. Flujo del proceso productivo de la caña

Para la realización del presente trabajo se planteó una frontera la cual está establecida desde el proceso de molienda o extracción del jugo de la caña, hasta obtener la panela

como producto final, por tal motivo las actividades con anterioridad a la extracción y posteriores a la obtención de la panela, podrán ser mencionadas, pero no tenidas en cuenta.

Según lo menciona Ubaque G. [20], el proceso productivo de la panela obedece a una serie de operación o actividades, las cuales se desarrollan de manera secuencial y dan como resultado la obtención de panela. Las operaciones que son descritas a continuación forman parte de la producción panelera y están enarcadas dentro de la frontera que plantea el proyecto.

2.2.1 Apronte

Abarca una serie de actividades, entre las cuales se encuentra recolectar la caña cortada, transportarla desde el sitio de cultivo hasta el trapiche y almacenarla en el depósito del trapiche [28].

2.2.1 Molienda

En esta etapa se somete la caña a compresión en los rodillos o mazas del molino, la cantidad de jugo que se extrae depende directamente de la eficiencia de la molienda y de la capacidad instalada. Los productos finales en esta etapa son el jugo crudo y el bagazo, este último es utilizado como combustible para la generación de vapor [28], [29].

2.2.2 Limpieza

El jugo de caña luego de ser extraído, debe ser sometido a una limpieza con el fin de remover la mayor cantidad de impurezas por medio de procesos físicos como decantación, flotación, procesos térmicos y bioquímicos. Esta es una de las etapas más importantes en la elaboración de la panela debido a que en esta etapa se adquieren una serie de características que determinan la calidad del producto final [28], [29].

2.2.3 Clarificación

La clarificación se logra mediante la acción combinada del calentamiento y de la acción aglutinante de ciertos compuestos naturales.

En esta misma fase se agregan una serie de cortezas de diversos árboles (balso, guásimo, cadillo, entre otros), los cuales al ser macerados y agregados producen una espuma a la cual se adhieren los residuos presentes en el jugo, permitiendo así extraer la cachaza negra y blanca [6].

2.2.4 Evaporación

En esta etapa los jugos son llevados hasta alcanzar la temperatura de ebullición en donde al ocurrir un cambio de fase del agua de líquido a vapor, se elimina prácticamente toda el agua presente en el jugo, aumentando el contenido de sólidos solubles ($^{\circ}Bx$) hasta el punto de obtener una mezcla conocida como miel [6].

2.2.5 Concentración (Tachos)

Esta es la etapa final del proceso, en esta se eleva el contenido de azúcar presente de los jugos, este es determinado por la cantidad de $^{\circ}Bx$, los cuales deben ser alrededor de 93% [28].

2.2.6 Punteo y batido

En el punteo se busca alcanzar el punto de miel apto para obtener la panela y en el batido se forman los cristales de sacarosa, estos son obtenidos por medio de la agitación durante el proceso de enfriamiento de la miel. Las mieles aquí obtenidas están próximas al estado de solidificación [28].

2.2.7 Moldeo

En esta etapa se da forma definitiva a la panela usando gaveras o moldes, este proceso se debe realizar en el menor tiempo posible debido a que las mieles se vuelven más densas conforme se enfrían. Después de transcurrido un tiempo se procede a desmoldar la panela para retirarlas de las gaveras o moldes evitando así resquebrajamiento o fisuras en el producto final [28].

2.2.8 Enfriamiento

Se procede a realizar un enfriamiento del producto terminado, con el objetivo de que este alcance la temperatura ambiente, esto se debe realizar en lugares que posean buena ventilación [28].

2.2.9 Empaque y almacenamiento

En esta etapa se debe garantizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del producto a través del tiempo, además se debe llevar un riguroso control en cuanto a peso, color y textura.

El producto luego de ser rotulado debe ser almacenado en un lugar que posea poca humedad para que esta no sea absorbida por la panela, además de evitar el contacto con el sol directo y el contacto con olores fuertes [28].

2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA QUE DEMANDAN VAPOR

En la elaboración de panela, el sistema de vapor está constituido principalmente por dos unidades: el generador de vapor, lugar donde este es producido y el circuito, el cual está conformado por tuberías y accesorios por las cuales circula el fluido y los equipos a los cuales se les suministra [18].

Según el volumen de control planteado para el caso de estudio, en la figura 1 se evidencian los procesos en los cuales se emplea vapor, a excepción del proceso de calentamiento de agua de macerado el cual hace parte de la molienda; en los procesos de calentamiento de agua de macerado, limpieza y clarificación, solamente se lleva a cabo un calentamiento del fluido, luego en los procesos de evaporación y tachos se continua calentando el fluido hasta lograr la evaporación de agua, de este modo se aumentan paulatinamente la cantidad de azúcar presente en el jugo, hasta obtener la consistencia adecuada de la panela, la cual es determinada con el contenido de *°Bx*.

En la etapa del calentamiento de agua de macerado se eleva la temperatura del agua, esta será empleada para remojar el bagazo y de este modo aumentar la extracción de sacarosa [30]. Las definiciones de la limpieza y clarificación de los jugos son adoptadas de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y Buenas Prácticas de Manufacturas (BPM) en la producción de la panela [31].

- **Limpieza:** en esta etapa se retiran impurezas gruesas de carácter no nutricional por medios físicos (decantación y flotación en el prelimpiador), térmicos (en las primeras pailas) y bioquímicos (con los aglutinantes). Comprende tres operaciones: prelimpieza, clarificación y encalado.

- **Prelimpieza:** el jugo crudo (guarapo) y sin clarificar se limpia en frío utilizando un sistema de decantación natural, por efecto de la gravedad. En el prelimpiador se retiene por precipitación una importante proporción de los sólidos contenidos en el jugo de la caña, como son partículas de tierra, lodo y arena; simultáneamente, por flotación, el prelimpiador separa partículas livianas como bagacillo, hojas, insectos, etc.

El prelimpiador debe estar situado entre la salida del molino y el pozuelo o paila recibidora, aprovechando la gravedad para la conducción de los jugos. Cuando el volumen de molienda es de mínimo una tonelada de caña por hora, con extracciones de jugo mayores al 55 %, es recomendable ubicar un segundo prelimpiador a continuación del primero, para asegurar una limpieza completa de los jugos. Los prelimpiadores se deben construir en acero inoxidable, y las dimensiones varían de acuerdo con el volumen de molienda de cada trapiche.

- **Clarificación:** esta fase tiene lugar en la paila recibidora o descachazadora, y consiste en la eliminación de las cachazas que son sólidos en suspensión, tales como bagacillos, hojas, arenas, tierra, sustancias coloidales y sólidos solubles presentes en el jugo de la caña. La limpieza de los jugos ocurre gracias a la acción combinada del calentamiento suministrado por la hornilla y la acción aglutinante de ciertos compuestos naturales permitidos dentro de las BPM como los cadillos, el balso, el guásimo, juaquin, entre otros.

Al macerar las cortezas de algunos árboles y arbustos, como el balso, el guásimo y el cadillo, se obtiene un mucílago que contiene polímeros celulósicos con propiedades aglutinantes. Los sólidos en suspensión se agregan entre sí y forman una masa homogénea que se conoce

como cachaza, la cual flota sobre el jugo y permite extraerla manualmente. La cachaza es de dos clases:

Cachaza negra: es la capa inicial de impurezas, se retira a la cachacera para separar el jugo extraído con la cachaza.

Cachaza blanca: es la segunda capa que se forma, es más liviana y se debe retirar con prontitud, antes de que los jugos alcancen la temperatura de ebullición, para poder remover las impurezas.

Utilización del balso: su corteza desprende una sustancia babosa que luego de ser macerada y mezclada con agua cambia de color y viscosidad; se denomina mucílago, y se adiciona al jugo de caña para clarificar los jugos.

La sustancia clarificante se sumerge directamente en el jugo cuando se alcanzan temperaturas entre 60 °C y 70 °C; la primera cachaza que se retira es la negra, antes de ebullición; luego se agrega más sustancia clarificante para retirar la cachaza blanca, a 92 °C aproximadamente.

Una buena clarificación determina, en gran parte, la calidad final de la panela, lo que incluye su color. La cachaza es llevada a la paila melotera donde se concentra hasta 45 °Bx – 50 °Bx; es llamada melote, y se emplea en la alimentación animal; se puede almacenar por un período prolongado.

Encalado: en la última parte de la limpieza se adiciona cal, preparando una lechada, con el objeto de regular la acidez de los jugos a un valor de pH de 5,8, para prevenir la formación de azúcares reductores (panela seruda o melcochuda) y ayudar a la clarificación de los jugos. Para cumplir con una BPM, la cal usada debe ser de tipo alimenticio para no contaminar la panela y obtener un producto inocuo.

- Evaporación: terminada la clarificación, se inicia la evaporación del agua aumentando de esta manera la concentración de azúcares en los jugos.

La eficiencia térmica de la hornilla, y su efecto sobre los jugos, se cuentan dentro del conjunto de factores que influyen en la calidad de la panela. Cuando los jugos alcanzan un contenido de sólidos solubles cercano a 70 °Bx adquieren el nombre de mieles, y se inicia la concentración. La evaporación del agua contenida en los jugos por calentamiento a 96

°C permite alcanzar la concentración de sólidos apropiada para la consolidación y el moldeo de la panela entre 120 °C y 125 °C. La eficiencia térmica de la hornilla tiene su repercusión en la calidad final del producto.

Cuando los jugos se han recogido en el fondo de la paila puntera, se agrega un agente antiadherente y antiespumante (cera de laurel, aceite de coco, aceite vegetal, entre otros) para homogenizar la miel y evitar que se queme la panela.

Estas operaciones se llevan a cabo en pailas o fondos dispuestos en línea, que reciben diferentes denominaciones técnicas y regionales. Las investigaciones realizadas por el CIMPA permitieron la fabricación de pailas eficientes y de mejor aprovechamiento del calor disponible. Dicho proceso condujo a la reducción de los tiempos de residencia, a la optimización de las características físicas del producto (color y consistencia), al aumento de los volúmenes de producción y al incremento del ingreso de los cañicultores.

La notable eficiencia térmica de la hornilla va aparejada con su bajo impacto sobre el medio ambiente, objetivo que se logró al reemplazar los combustibles adicionales, como la leña, por el uso del bagazo, únicamente. Además, por el establecimiento de huertos leñeros, con especies arbóreas de rápido crecimiento, alta productividad y alto poder calórico en combustión. Este beneficio ambiental propicia la conservación del recurso bosque y la reducción de emanaciones de gases de invernadero a la atmósfera, al tiempo que se disminuyen los costos de producción.

La definición del término de "Tachos", es extraída del ministerio de agricultura y desarrollo rural [24], esta es contemplada de la siguiente manera:

- **Tachos:** es la fase final del proceso, se presenta a temperaturas superiores a los 100 °C, se realiza en la paila punteadora o concentradora. En esta parte se adicionan el agente antiespumante y antiadherente. La inversión de la sacarosa es función de la temperatura, el pH y el tiempo de residencia de los jugos en la hornilla. A partir de 100 °C la inversión se acelera notablemente, por lo que se debe procurar mantener los jugos el menor tiempo posible a esa temperatura y con un pH cercano a 5,8.

El "Punto" de panela se obtiene entre 118 °C y 125 °C, con un porcentaje de sólidos solubles entre 88 °Bx y 94 °Bx determinándose por la consistencia, color y densidad de las mieles.

La temperatura final de punteo depende, en orden de importancia, de los *°Bx* de las mieles, de la altura sobre el nivel del mar y de la pureza de las mieles.

Un sistema de vapor típico, empieza por la generación del mismo, por eso es indispensable plantear un generados de vapor, es decir se asumirá un generador de vapor pirotubular, en el los humos de la combustión circula por una serie de tubos, estos al entrar en contacto con el agua la calientan hasta el punto de convertirla en vapor para así ser aprovechado en los diferentes procesos ya mencionados; se asume este tipo de generador de vapor ya que para la generación de la llama se empleara el bagazo de la caña, producto que es obtenido después de extraer el jugo de caña.

El sistema de vapor asumido para la simulación del proyecto está representado en la figura 2 y consta inicialmente de:

- Generador de vapor.
- Un intercambiador para calentar el agua de macerado.
- Dos Intercambiadores usados en la etapa de clarificación
- Un intercambiador empleado en la evaporación.
- Tres tachos dispuestos en la etapa final del proceso.

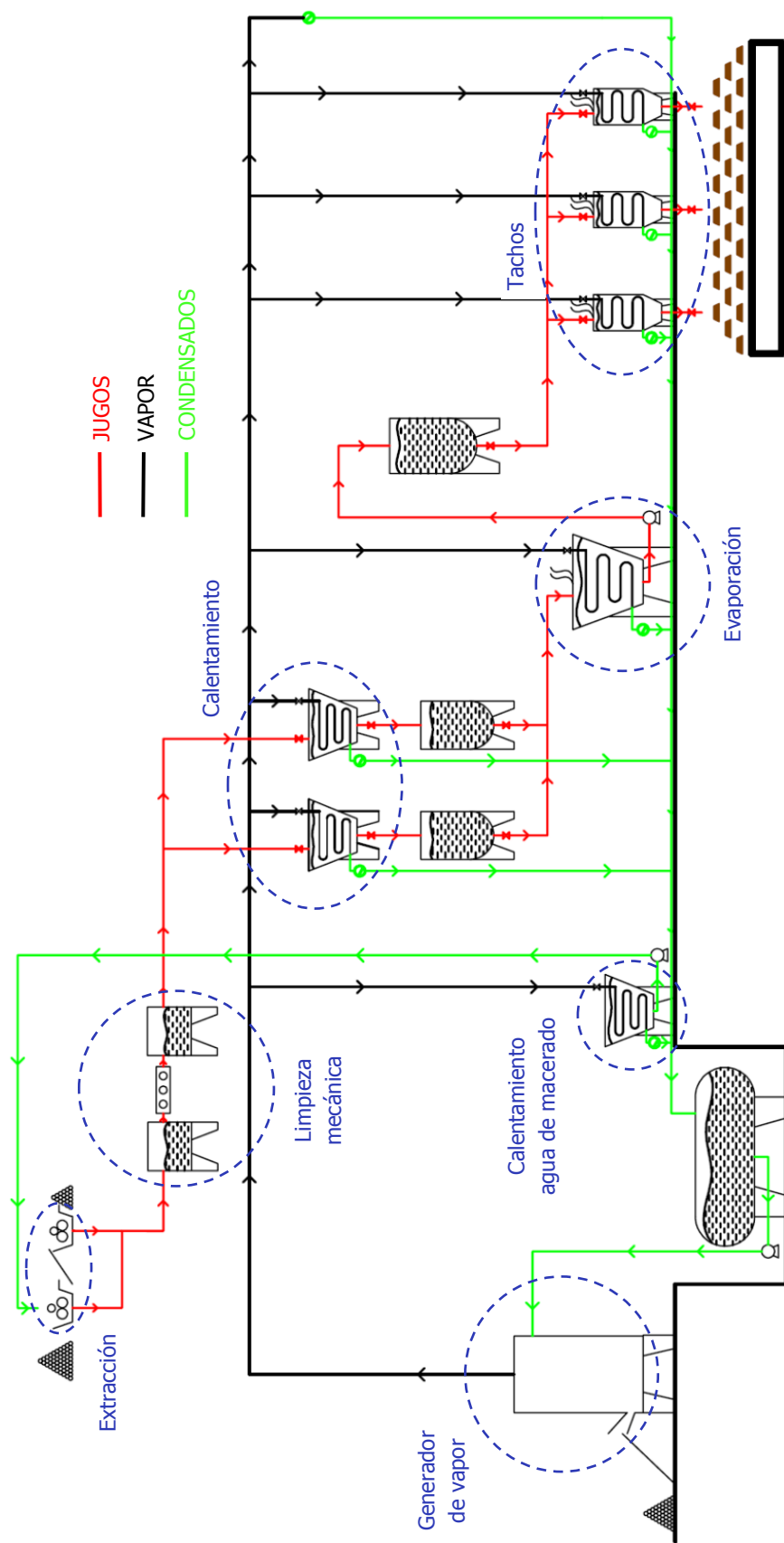


Figura 2. Esquema general del proceso productivo de la panela.

3. ANÁLISIS ENERGÉTICO TEÓRICO

A continuación, siguiendo con el desarrollo de los objetivos específicos, se encuentra el desarrollo que se llevó a cabo en la implementación del análisis energético teórico y la comparación de los resultados obtenidos con la literatura.

3.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

El análisis termodinámico corresponde a la implementación de un balance de masa, un balance de energía y realizar el cálculo de la eficiencia de los procesos en los cuales se suministra vapor como fuente de energía.

Al realizar el análisis termodinámico se identificaron los procesos en los cuales se evidencia un mayor consumo energético, de este modo se podrán tomar algunas medidas para disminuir el consumo energético en un determinado punto.

3.1.1 Principio de conservación de la masa

El concepto de conservación de la masa, también conocido como (balance de masa), es adoptado del libro de termodinámica de Cengel y Boles [8], en este se plantea la ecuación general para la realización de los cálculos en el desarrollo del proyecto.

El principio de conservación de la masa enuncia que: para un volumen de control se puede expresar como la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante Δt ; expresada en forma de tasa se tiene que:

$$\left(\begin{matrix} \text{Masa total que entra} \\ \text{al VC durante } \Delta t \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{Masa total que sale} \\ \text{del VC durante } \Delta t \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \text{Cambio de la masa dentro} \\ \text{del VC durante } \Delta t \end{matrix} \right)$$
$$\dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale} = \frac{dm_{VC}}{dt} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad \text{Ec. (1)}$$

donde \dot{m}_{entra} y \dot{m}_{sale} corresponden a los flujos másicos hacia adentro y desde el volumen de control, y $\frac{dm_{vc}}{dt}$ es la misma rapidez de cambio de masa con respecto al tiempo dentro de la frontera del volumen de control.

Para el caso de estudio, corresponde a los intercambiadores presentes en el trapiche, en los cuales todos están abiertos a la atmosfera, estos poseen tres volúmenes de control, los cuales son: el serpentín, el jugo y el recipiente en que interactúa el serpentín y el jugo definido por la geometría de la paila; el respectivo balance de masa que se le realiza en estos equipos es simple, se asume que el vapor que entra por el serpentín se condensa todo al final del mismo, y disminuye su temperatura levemente; en el jugo no se presenta variación alguna entre el flujo de entrada y salida, a excepción de los casos en los cuales se evapora parte del agua presente en los jugos, esto ocurre en los procesos de evaporación y tachos.

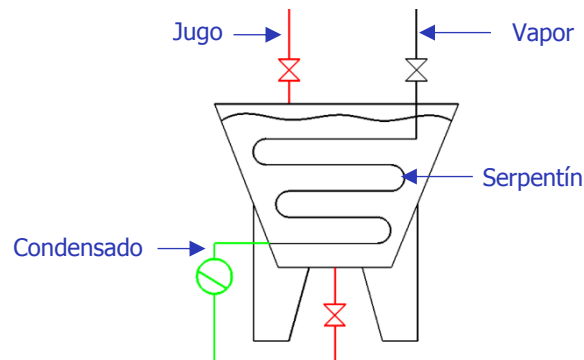


Figura 3. Intercambiador abierto a la atmosfera

Para la condición de estado estable, si se toma el serpentín como volumen de control representado en la figura 3, se tiene:

$$\dot{m}_{entra\ vapor} = \dot{m}_{condensado} \quad \text{Ec. (2)}$$

Al tomar el jugo como volumen de control se tienen dos situaciones: en la Ec. 3 se expresa un balance de masa cuando solamente existe calentamiento del jugo, y en la Ec. 4 se contempla calentamiento del jugo y evaporación de agua.

$$\dot{m}_{entra\ jugo} = \dot{m}_{sale\ jugo} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\dot{m}_{entra\ jugo} = \dot{m}_{sale\ jugo} + \dot{m}_{agua\ evaporada} \quad \text{Ec. (4)}$$

Finalmente, al tomar como volumen de control el intercambiador se tiene dos ecuaciones, en la Ec. 5 no se tiene en cuenta la evaporación de agua, contrario a lo que sucede en la Ec. 6, en la que si se contempla.

$$\dot{m}_{entra\ vapor} + \dot{m}_{entra\ jugo} = \dot{m}_{condensado} + \dot{m}_{sale\ jugo} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\dot{m}_{entra\ vapor} + \dot{m}_{entra\ jugo} = \dot{m}_{condensado} + \dot{m}_{sale\ jugo} + \dot{m}_{agua\ evaporada} \quad \text{Ec. (6)}$$

3.1.2 Balance de energía

La definición del balance de energía es adoptada del libro de termodinámica de Cengel y Boles [8], en este se plantea la ecuación general para la realización de los cálculos en el desarrollo del proyecto.

Si se toma el proceso como un estado estable, el contenido de energía total en el volumen de control permanece constante, por lo tanto, el cambio en la energía total del volumen de control es cero. Por consiguiente, la cantidad de energía que entra en el volumen de control es igual a la que sale.

$$\dot{E}_{entra} = \dot{E}_{sale} \quad \text{Ec. (7)}$$

Como la energía se puede manifestar en diversas formas como son el calor, el trabajo y masa solamente, la ecuación 7, se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{entra} + \dot{W}_{entra} + \sum_{entra} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{sale} + \dot{W}_{sale} + \sum_{sale} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

Se define una convención de signos con el fin de obtener una cantidad de calor o trabajo positiva, es decir se asume que se transferirá calor hacia el sistema a una tasa de calor \dot{Q} (entrada de calor), y que se producirá trabajo por el sistema a una tasa \dot{W} (salida de trabajo), en consecuencia, el balance de energía en el caso de un sistema en general de flujo estacionario se convierte en:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sale} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{entra} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad \text{Ec. (9)}$$

Para dispositivos que poseen una entrada y una salida, la ecuación de balance de energía de flujo estacionaria es:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_{sale} - h_{entra} + \frac{v_{sale}^2 - v_{entra}^2}{2} + g(z_{sale} - z_{entra}) \right] \quad \text{Ec. (10)}$$

Si el fluido no experimenta cambios en la energía cinética y potencial, además en el intercambiador no existe intercambio alguno de energía en forma de trabajo con sus alrededores, la ecuación 10, se puede reescribir de la forma:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{sale} - h_{entra}) \quad \text{Ec. (11)}$$

Para realizar el balance de energía en el intercambiador se debe asumir uno de los tres volúmenes de control: el serpentín, el jugo o el recipiente, luego se procede a calcular la entalpía que es función de la temperatura y presión para este caso. Si se toma como volumen de control el serpentín, y este posee mayor energía que el jugo, se sabrá que la tasa de transferencia de calor se da en la dirección serpentín hacia el jugo, organizando la ecuación y teniendo en cuenta el sentido, se tiene que:

$$\dot{Q} = (\dot{m}h)_{entrada\ serpentín} - (\dot{m}h)_{salida\ serpentín} \quad \text{Ec. (12)}$$

Teniendo en cuenta el concepto de la conservación de la energía, la energía que cede el serpentín es la misma que gana el jugo; en el caso en que existe evaporación, la energía que se emplea para evaporar cierta cantidad de agua, es la misma que el jugo cede al vapor de agua y esta a su vez es igual a la que el jugo a ganado del serpentín.

3.1.3 Cálculo de la eficiencia

El concepto de eficiencia en un intercambiador es tomado del libro de transferencia de calor de J. P. Holman [37], aquí se plantea la ecuación general para la realización de los cálculos en las etapas 1 y 4, debido a que en estas no se presenta cambio de fase.

Para el estudio del intercambiador de calor en régimen permanente, el concepto de efectividad del intercambiador de calor se define como la relación entre la tasa de transferencia de calor real y la velocidad de transferencia de calor máxima posible.

$$\varepsilon = \frac{\text{transferencia de calor real}}{\text{m}{\acute{a}}xima transferencia de calor posible} \quad \text{Ec. (13)}$$

La transferencia de calor real se puede obtener calculando tanto la energ{\'ı}a perdida por el fluido caliente, como la energ{\'ı}a ganada por el fluido fr{\'ı}o. Para un intercambiador de flujo paralelo se tiene

$$q = \dot{m}_{fc} c_{fc} (T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Salida } fc}) = \dot{m}_{ff} c_{ff} (T_{\text{Salida } ff} - T_{\text{Entrada } ff}) \quad \text{Ec. (14)}$$

donde c representa la capacidad calor{\'ı}fica y los sub{\'ı}ndices fc y ff hacen referencia a los fluidos caliente y fr{\'ı}o respectivamente.

La m{\'a}xima transferencia de calor posible para el intercambiador se alcanzar{\'ı}a si uno de los fluidos experimentase una variaci{\'o}n de temperatura igual a la diferencia m{\'a}xima de temperaturas que se da en el intercambiador, que es la diferencia entre las temperaturas de entrada de los fluidos caliente y fr{\'ı}o. El fluido que podr{\'ı}a experimentar esta diferencia m{\'a}xima de temperaturas ser{\'ı}a aqu{\'e}l que tuviese el valor de $\dot{m}c$ m{\'ı}nimo, puesto que el balance de energ{\'ı}a exige que la energ{\'ı}a recibida por uno de los fluidos sea igual a la cedida por el otro; si fuese el fluido con mayor $\dot{m}c$ el que alcanzara la m{\'a}xima diferencia de temperaturas, esto exigir{\'ı}a que el otro fluido experimentase una diferencia de temperaturas mayor que la m{\'a}xima, y esto es imposible. As{\'ı}, la transferencia de calor m{\'a}xima posible se expresa como

$$q_{\text{m}{\acute{a}}x} = (\dot{m}c)_{\text{min}} (T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Entrada } ff}) \quad \text{Ec. (15)}$$

El fluido con la capacidad calor{\'ı}fica m{\'ı}nima puede ser tanto el caliente como el fr{\'ı}o, dependiendo de los flujos m{\'a}sicos y los calores espec{\'ı}ficos; la m{\'ı}nima capacidad calor{\'ı}fica la posee el fluido caliente en la Ec. 16 y el fluido fr{\'ı}o en la Ec. 17.

$$\varepsilon_{fc} = \frac{\dot{m}_{fc} c_{fc} (T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Salida } fc})}{\dot{m}_{fc} c_{fc} (T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Entrada } ff})} = \frac{(T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Salida } fc})}{(T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Entrada } ff})} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\varepsilon_{ff} = \frac{\dot{m}_{ff} c_{ff} (T_{\text{Salida } ff} - T_{\text{Entrada } ff})}{\dot{m}_{ff} c_{ff} (T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Entrada } ff})} = \frac{(T_{\text{Salida } ff} - T_{\text{Entrada } ff})}{(T_{\text{Entrada } fc} - T_{\text{Entrada } ff})} \quad \text{Ec. (17)}$$

De manera general, se tiene que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T \text{ (fluido minimo)}}{\text{Diferencia de temperatura máxima en el intercambiador}} \quad \text{Ec. (18)}$$

La anterior eficiencia resulta ser ideal para las etapas de calentamiento de agua de macerado y el calentamiento del jugo de caña, debido a que no se contemplan perdidas asociadas a fenómenos como la convección, radiación, entre otros.

Para poder determinar todas las perdidas asociadas a los diferentes factores que influyen en el proceso productivo de la panela, es necesario realizar un trabajo de campo para recolectar la información pertinente y de esta manera establecer las perdidas presentes en los procesos; sin embargo, se puede tener una aproximación del valor real de la eficiencia, determinando la perdida de calor más significativa que se presenta en estos, es decir el calor que se intercambia con el ambiente a través de la alberca; para este caso en particular se propone una configuración para la construcción de la siguiente manera, en su interior se propone emplear una placa de acero inoxidable AISI 304 debido a que esta estará en contacto con el jugo de caña y las mieles, se estima un espesor de $\frac{3}{16}$ in y una conductividad térmica $K = 14,9 \text{ W/mK}$ [38], la parte externa se propone una chapa de acero estructural A36 de calibre 10, espesor $3,42 \text{ mm}$ y $K = 48 \text{ W/mK}$ [39], en el intermedio de estos dos materiales se emplea un material que funciona como aislante, el cual soporte las temperaturas de ebullición del jugo de caña que se presentan alrededor de los $97 \text{ }^\circ\text{C}$, en este caso se emplea asbesto grado comercial de espesor 8 mm y $K = 0,046 \text{ W/mK}$ [37].

Según Restrepo, Flores y Tibaquirá [40], la pérdida más significativa de energía se puede calcular empleando el modo de conducción térmica; para el caso de estudio esta se da a través de tres materiales que componen la alberca.

$$E_{\text{perdida}} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\frac{L_{\text{inox}}}{K_{\text{inox}}A_{\text{inox}}} + \frac{L_{\text{asbesto}}}{K_{\text{asbesto}}A_{\text{asbesto}}} + \frac{L_{\text{acero}}}{K_{\text{acero}}A_{\text{acero}}}} \quad \text{Ec. (19)}$$

A_{inox} es el área en contacto con el jugo de caña, A_{asbesto} corresponde al área del material aislante y A_{acero} representa el área de la placa de acero en contacto con el medio, se asume un área promedio para cada uno de los materiales de 13 m^2 en el proceso de evaporación

y 5 m^2 para cada tacho en el proceso final; L representa el espesor de los diferentes materiales; T_{int} es la temperatura al interior de la alberca en contacto con el acero inoxidable y T_{ext} es la temperatura en el exterior de la chapa de acero.

Empleando la Ec. 20 se puede determinar la eficiencia en los procesos de evaporación y tachos.

$$\varepsilon = \frac{E_{real}}{E_{teorica}} \quad \text{Ec. (20)}$$

donde la $E_{teorica}$ es calculada sin tener en cuenta las pérdidas y la E_{real} tiene en cuenta la perdida más significativa descrita en la Ec 19; la Ec. 21 muestra el balance de energía para el proceso de evaporación en alberca.

$$E_{real} = Q_{latente} + E_{sale} + E_{perdida} - E_{entra} \quad \text{Ec. (21)}$$

E_{entra} representa la energía que entra al proceso, E_{sale} indica la energía que sale con la miel una vez se alcanzan los $^{\circ}\text{Bx}$, $E_{perdida}$ es la energía que se disipa al ambiente y $Q_{latente}$ corresponde con el calor latente estimado mediante la Ec.22. La energía que entra con el jugo de caña y sale con la miel son determinadas empleando las Ec. 23-A y Ec. 23-B.

$$Q_{latente} = m_{agua \text{ evaporada}} h_{fg} \quad \text{Ec. (22)}$$

$$E_{entra} = m_{entra \text{ jugo}} C_{p \text{ entra}} (\Delta T) \quad \text{Ec. (23-A)}$$

$$E_{sale} = m_{sale \text{ miel}} C_{p \text{ sale}} (\Delta T) \quad \text{Ec. (23-B)}$$

$m_{entra \text{ jugo}}$ y $m_{sale \text{ miel}}$ son las masas a la entrada y salida del proceso respectivamente; $C_{p \text{ entra}}$ y $C_{p \text{ sale}}$ indican la capacidad térmica específica a la entrada y salida del proceso, estos son función de los $^{\circ}\text{Bx}$, para determinar el C_p a la entrada y a la salida, se emplean las siguientes expresiones [36], [40].

$$C_{p \text{ entra}} = 4,1868(1 - (0,06^{\circ}\text{Bx}_{Ini})) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right] \quad \text{Ec. (24)}$$

$$C_{p \text{ sale}} = 4,1868(1 - (0,06^{\circ}\text{Bx}_{Evap})) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right] \quad \text{Ec. (25)}$$

3.2 PROCEDIMIENTO REALIZADO

Para determinar la cantidad de energía en términos de calor que se suministra a cada uno de los procesos que se identificaron inicialmente que consumen vapor, es primordial determinar una serie de parámetros como lo son las cantidades de jugo extraídos en el proceso, el vapor producido en el generador, la cantidad de calor que se le suministra al agua para calentar o evaporar, entre otros y así posteriormente poder aplicar el concepto de conservación de la energía y caracterizar los estados del proceso con su respectivo balance de masa y su eficiencia.

El proceso productivo de la panela será dividido en 3 etapas (extracción y limpieza, generación de vapor y la transferencia de calor en los intercambiadores, esta última comprende las fases de calentamiento, evaporación, tachos y calentamiento de agua de macerado); esto se hace con la finalidad de tener claridad a que etapa del proceso corresponde cada cálculo y poder ilustrar el componente que se está analizando.

3.2.1 Extracción y limpieza

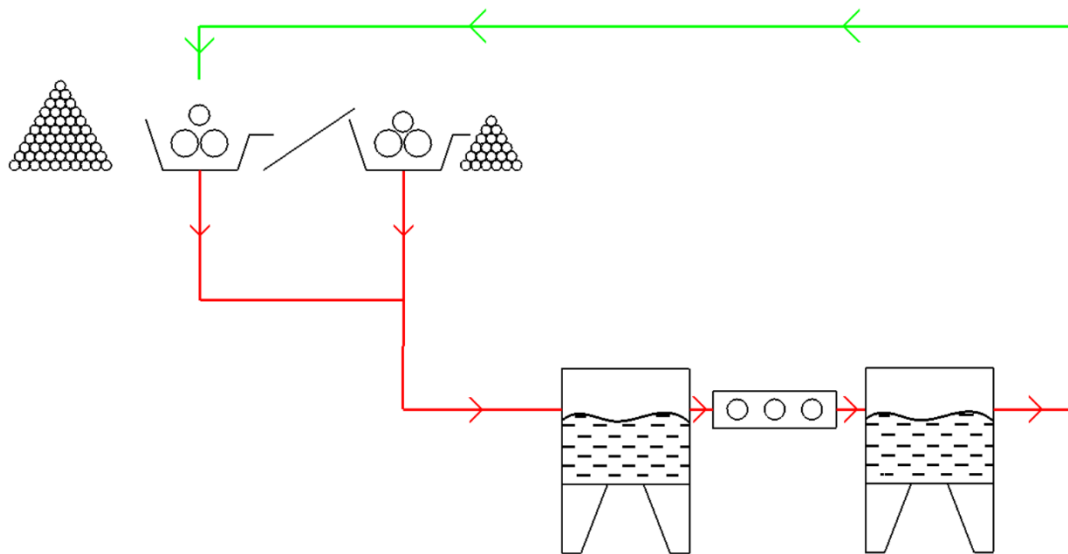


Figura 4. Proceso de extracción y limpieza.

- **Molienda de caña:** ($Mol_{caña}$)

La molienda corresponde al primer proceso planteado al interior de la frontera; para el desarrollo del presente trabajo se asume que se procesan $10 \frac{t}{dia}$ de caña, y se labora en una jornada de 8 h.

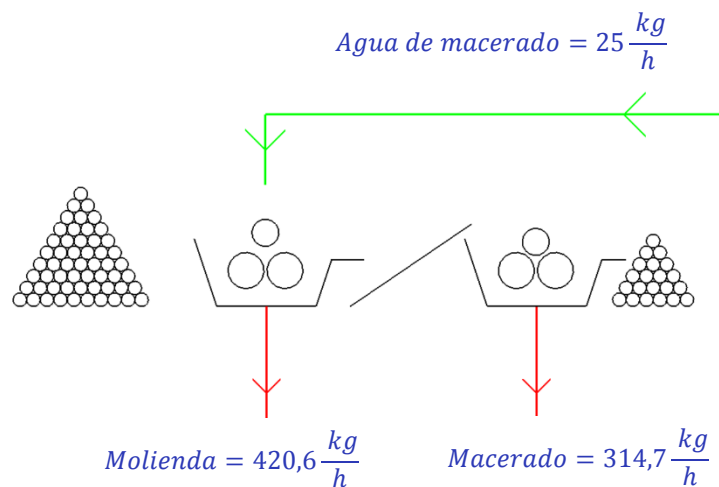


Figura 5. Molienda y macerado.

$$Mol_{Caña} = \frac{\text{Procesamiento de caña (kg)}}{\text{Jornada (h)}} \quad \text{Ec. (26)}$$

$$Mol_{Caña} = \frac{10000 \text{ kg}}{8 \text{ h}} = 1250 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Porcentaje de fibra:** ($Porcentaje_{Fibra}$)

Según la literatura los porcentajes de fibra de caña alcanzan valores promedio de 15,58% para la caña limpia y 17,03% para la sucia [32]; para este caso se asumirá un valor del 16%.

- **Porcentaje de jugo:** ($Porcentaje_{Ext \text{ jugo}}$)

Según lo anterior, el máximo porcentaje de extracción posible para la caña será del 84%.

- **Contenido total de jugo en la caña:** ($Cont_{Jugo \text{ Caña}}$)

Teniendo en cuenta la molienda y el máximo porcentaje de extracción, se puede estimar el contenido total del jugo de caña.

$$Cont_{Jugo \text{ Caña}} = (Porcentaje_{Ext \text{ jugo}})(Mol_{Caña}) \quad \text{Ec. (27)}$$

$$Cont_{Jugo \text{ Caña}} = (0,84)(1250) \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 1050 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

- **Porcentaje de grados Brix:**

Los grados Brix expresan la cantidad de sacarosa contenida en los jugos de caña [30]. Los valores aquí expresados, corresponden a los valores típicos del porcentaje de °Bx presentes en las etapas de extracción, evaporación y la etapa final respectivamente [17].

$$°Bx_{Ini} = 17 \%$$

$$°Bx_{Evap} = 60 \%$$

$$°Bx_{Fin} = 93 \%$$

Como resultado, el producto final tendrá una concentración estimada de $°Bx_{Fin} = 93 \%$, con una $Hum_{Final \text{ Panela}} = 7 \%$.

- **Producción de panela:** ($Prod_{panela}$)

La producción de panela corresponde a un trapiche de mediana escala, según el porcentaje de aprovechamiento de la caña y el ministerio de agricultura y desarrollo social [6], [7].

$$Prod_{panela} = 125 \frac{kg}{h}$$

La sacarosa procesada es:

$$Sacarosa_{sac} = \left(\frac{°Bx_{Fin}}{100\%} \right) (Prod_{panela}) \quad \text{Ec. (28)}$$

$$Sacarosa_{sac} = \left(\frac{93\%}{100\%} \right) \left(125 \frac{kg}{h} \right) = 116,25 \frac{kg}{h}$$

$$Agua_{sac} = \left(\frac{Hum_{Final\ Panela}}{100\%} \right) (Prod_{panela}) \quad \text{Ec. (29)}$$

$$Agua_{sac} = \left(\frac{7\%}{100\%} \right) \left(125 \frac{kg}{h} \right) = 8,75 \frac{kg}{h}$$

- **Jugos procesados después de pérdidas:** ($Jugos_{DP}$)

Con la cantidad de sacarosa procesada se puede saber cuáles son los jugos procesados; es necesario descontar el producto perdido en el filtrado mecánico y en la separación química de la cachaza. Este es tomado al momento de salir del tanque de sedimentación.

$$Jugos_{DP} = \frac{Sacarosa_{sac}}{\left(\frac{°Bx_{Ini}}{100\%} \right)} \quad \text{Ec. (30)}$$

$$Jugos_{DP} = \frac{116,25 \frac{kg}{h}}{\left(\frac{17\%}{100\%} \right)} = 683,82 \frac{kg}{h}$$

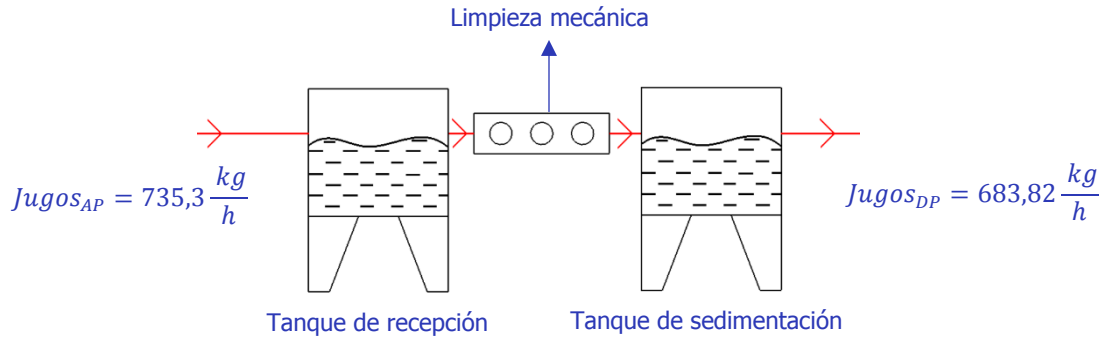


Figura 6. Proceso de limpieza.

- **Jugos procesados antes de pérdidas:** ($Jugos_{AP}$)

Empleando como referencia el esquema anterior, este valor es tomado cuando el jugo entra al tanque recibidor; este expresa la cantidad de jugo que se procesa teniendo la máxima concentración de $^{\circ}Bx$.

$$Jugos_{AP} = \frac{Jugos_{DP}}{\left(\frac{^{\circ}Bx_{Fin}}{100\%}\right)} \quad \text{Ec. (31)}$$

$$Jugos_{AP} = \frac{683,82 \frac{kg}{h}}{\left(\frac{93\%}{100\%}\right)} = 735,3 \frac{kg}{h}$$

- **Porcentaje de extracción:** (*Extracción*)

En el macerado se recupera alrededor de un 50% de los jugos que no fueron extraídos en la molienda inicial, esta etapa de recuperación es denotada de la siguiente manera: ($Macerado_{Recuperado}$).

Jugos extraídos en la molienda inicial:

$$Jugos_{M1} = (Mol_{caña})(Extracción) \quad \text{Ec. (32)}$$

$$Jugos_{M1} = \left(1250 \frac{kg}{h}\right)(Extracción)$$

Jugos extraídos en el macerado:

$$Jugos_{M2} = \left(\frac{Macerado_{Recuperado}}{100\%} \right) (Cont_{Jugo\ caña} - Jugos_{M1}) \quad \text{Ec. (33)}$$

$$Jugos_{M2} = \left(\frac{50\%}{100\%} \right) \left(1050 \frac{kg}{h} - Jugos_{M1} \right)$$

Jugos procesados antes de perdidas:

$$Jugos_{AP} = Jugos_{M1} + Jugos_{M2} \quad \text{Ec. (34)}$$

Resolviendo el sistema simultáneamente, obtenemos:

$$Jugos_{M1} = 420,6 \frac{kg}{h}$$

$$Jugos_{M2} = 314,7 \frac{kg}{h}$$

$$Extracción = 0,3365$$

- **Porcentaje de extracción luego de macerado:** ($Ext_{Macerado}$)

El Porcentaje de extracción anterior ($Extracción$), no tiene en cuenta la extracción presente en el macerado. El porcentaje de extracción como parámetro de funcionamiento de los molinos de caña se refiere a este porcentaje sin macerado; por consiguiente, el porcentaje de extracción luego de macerado sería:

$$Ext_{Macerado} = \frac{Jugos_{AP}}{Mol_{Caña}} \quad \text{Ec. (35)}$$

$$Ext_{Macerado} = \frac{735,3 \frac{kg}{h}}{1250 \frac{kg}{h}}$$

$$Ext_{Macerado} = 0,5882$$

3.2.2. Generación de vapor

En esta etapa se tiene en cuenta la cantidad de bagazo que es obtenido luego de la molienda, la potencia generada al quemar el bagazo y la cantidad de vapor producido.

- **Bagazo quemado:** ($Bagazo$)

El bagazo quemado en la caldera es un subproducto obtenido después de la extracción del jugo de caña presente en los procesos de la molienda y el macerado.

$$Bagazo = Mol_{Caña} - Jugo_{AP} \quad \text{Ec. (36)}$$

$$Bagazo = (1250 - 735,3) \frac{kg}{h}$$

$$Bagazo = 514,7 \frac{kg}{h}$$

- **Potencia entregada por el bagazo:** (Pot_{Bagazo})

El poder calorífico, según el Ministerio de Agricultura, se define como la máxima cantidad de calor que se puede obtener de un combustible cuando se quema en forma completa y sus productos son enfriados hasta la temperatura original de la mezcla aire-combustible.

El poder calorífico superior de la caña de azúcar, con un contenido de humedad del 30% es de $P_{CS}=12970 \frac{kJ}{kg}$ [4]; asimismo se estima una eficiencia del 67% en el generador de vapor, el cual está representada por la letra (n) [33].

$$Pot_{Bagazo} = (P_{CS})(Bagazo)(n) \quad \text{Ec. (37)}$$

$$Pot_{Bagazo} = \left(12970 \frac{kJ}{kg}\right) \left(514,7 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{67\%}{100\%}\right) \left(\frac{1 kW}{3600 \frac{kJ}{h}}\right)$$

$$Pot_{Bagazo} = 1242,41 kW$$

Se realiza la conversión a Boiler Horsepower (BHP), debido a que esta unidad es empleada con mayor frecuencia para designar la potencia de caldera.

$$Pot_{Bagazo} = (1242,41 kW) \left(\frac{1 BHP}{9,81 kW}\right) = 126,64 BHP$$

- **Potencia producida en el generador de vapor:** ($Pot_{Generador}$)

La potencia que se obtiene en el generador de vapor es la suministrada por el bagazo de caña, debido a que no se emplea otro tipo de combustible.

$$Pot_{Generador} = Pot_{Bagazo} \quad \text{Ec. (38)}$$

$$Pot_{Generador} = 126,64 BHP$$

- **Vapor producido:** (Vap_{Prod})

Teniendo en cuenta la temperatura de alimentación en el generador de vapor y su presión de trabajo, las cuales son $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P = 98,07\text{ kPa}$ [34], se procede a determinar el flujo de masa del vapor generado, empleando la siguiente ecuación:

$$Vap_{Prod} = (Pot_{Generador})(FE) \quad \text{Ec. (39)}$$

donde FE corresponde al factor de evaporación [35], este valor es el correspondiente a la presión atmosférica estándar, es de aclarar que la presión que se asume para la realización del proyecto es la que actúa sobre la región del Valle del Cauca.

$$FE = 34,5 \left(\frac{lb\ vapor}{h} \right) / BHP$$

Reemplazando los valores en la Ec.39, se tiene que:

$$Vap_{Prod} = (126,64\ BHP) \left(34,5 \left(\frac{lb\ vapor}{h} \right) / BHP \right) = 4369,1 \frac{lb\ vapor}{h}$$

- **Factor de rendimiento:** (FR)

Es la relación existente entre la cantidad de panela producida por unidad de caña molida.

$$FR = \frac{Prod_{panela} \frac{kg}{h}}{Mol_{caña} \frac{kg}{h}} \quad \text{Ec. (40)}$$

$$FR = \frac{125 \frac{kg}{h}}{1250 \frac{kg}{h}} = 0,1 = 10\%$$

3.2.3. Cálculo de la tasa de transferencia de calor en los intercambiadores

Según la frontera planteada para desarrollar el trabajo, inicialmente se identificaron 4 procesos al interior de esta donde existe consumo de vapor, estos son: calentamiento de los jugos, evaporación, tachos y el calentamiento de agua de macerado. Solamente se realizará el cálculo de la tasa de transferencia de calor en los tres primeros procesos nombrados y para determinar la tasa de transferencia de calor en la etapa de calentamiento de agua de macerado se empleará el software EES.

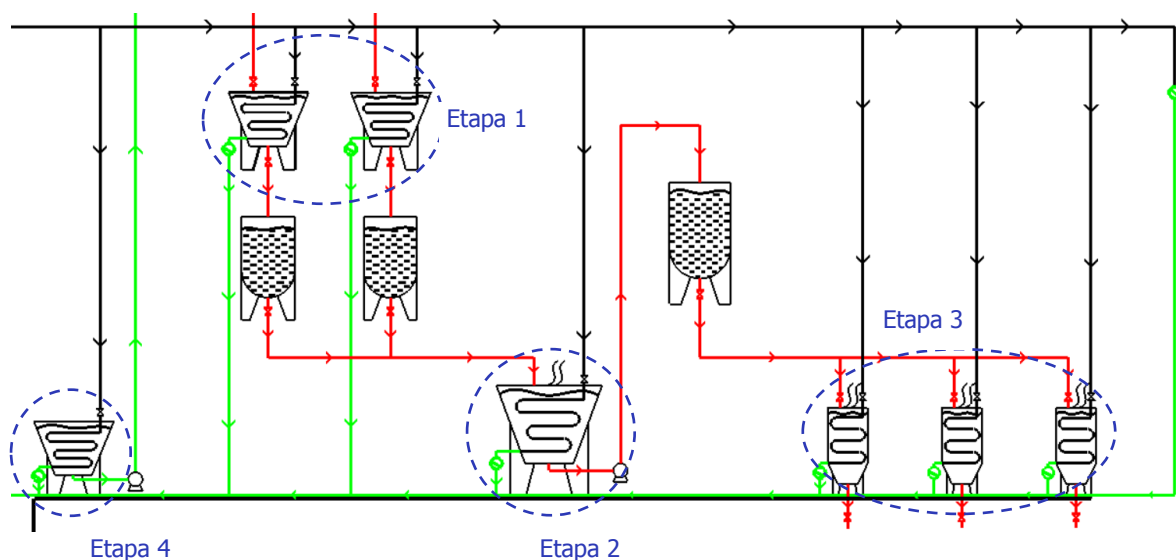


Figura 7. Etapas donde se evidencia consumo de vapor

3.2.3.1. Tasa de transferencia en la Etapa 1

Este procedimiento se lleva cabo después de la etapa de limpieza mecánica y decantación de los jugos, en esta misma fase es necesario determinar la cantidad de agua limpia que se debe agregar al proceso, como también que tanta agua se debe agregar en el proceso de macerado. En la figura 8, se disponen de dos intercambiadores abiertos a la atmosfera, de iguales características.

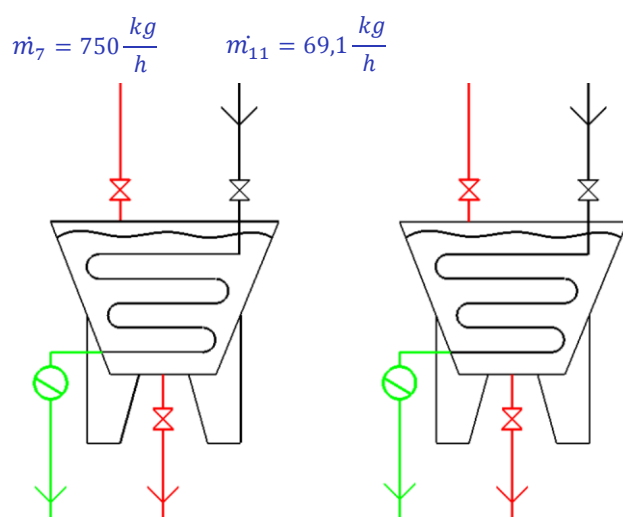


Figura 8. Proceso de calentamiento de jugos.

donde m_7 representa el flujo de jugo que entra en un solo intercambiador, y el m_{11} corresponde al flujo de vapor para este; al no existir evaporación en esta etapa las magnitudes de las variables con constantes.

- **Calentamiento y limpieza:**

En esta etapa se realiza el calentamiento de la mezcla, además de una limpieza química con cal y floculantes.

$$Mezcla_{M1} = Jugos_{AP} + Agua_{Macerado} + Agua_{Limpia} \quad \text{Ec. (41)}$$

Se tiene que el agua adicionada en el macerado corresponde al 2% de la molienda de caña.

$$Agua_{Macerado} = (Mol_{Caña}) \left(\frac{2\%}{100\%} \right) \quad \text{Ec. (42)}$$

$$Agua_{Macerado} = \left(1250 \frac{kg}{h} \right) (0,02) = 25 \frac{kg}{h}$$

Para determinar la cantidad de agua limpia que se debe adicionar, es necesario agregar un 20% más de agua por encima del valor de la molienda de caña.

$$Agua_{Limpia} = ((Mol_{Caña})(1,2)) - (Agua_{Macerado} + Jugos_{AP}) \quad \text{Ec. (43)}$$

$$Agua_{Limpia} = [((1250)(1,2)) - (25 + 735,3)] \frac{kg}{h}$$

$$Agua_{Limpia} = 739,7 \frac{kg}{h}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la Ec. 41, se podrá determinar el valor correspondiente a $Mezcla_{M1}$.

$$Mezcla_{M1} = 1500 \frac{kg}{h}$$

El calor específico presente en el jugo de caña es función del porcentaje de OBx presente en la solución, este es determinado por la Ec. 24.

$$C_P = \left[1 - ((0,06)(0,17)) \frac{kCal}{kg^{\circ}C} \right] \left[\frac{4,1868 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}}{1 \frac{kCal}{kg^{\circ}C}} \right]$$

$$C_P = 4,144 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$$

La temperatura de entrada está ligeramente mayor a la del ambiente debido a que el agua de macerado se encuentra a una temperatura elevada y la temperatura de salida se encuentra ligeramente menor al punto de ebullición, estos valores son tomados de la literatura [24], [31]; teniendo los valores de las temperaturas, se determina la tasa de transferencia de calor para elevar en 62 °C el jugo.

$$T_{Ent \text{ Calentador}} = 35^{\circ}C$$

$$T_{Sal \text{ Calentador}} = 94^{\circ}C$$

$$\dot{Q}_1 = (Mezcla_{M1})(C_P)(T_{Sal \text{ Calentador}} - T_{Ent \text{ Calentador}}) \quad \text{Ec. (44)}$$

$$\dot{Q}_1 = \left(1500 \frac{kg}{h} \right) \left(4,144 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right) (94^{\circ}C - 35^{\circ}C) \left(\frac{1 h}{3600 s} \right)$$

$$\dot{Q}_1 = 101,87 \frac{kJ}{s}$$

Este valor representa la tasa de transferencia de calor entre el vapor y el jugo después de salir del proceso de limpieza y clarificado; esta servirá para determinar el balance de masa, de energía y la eficiencia, mediante el software EES.

3.2.3.2. Tasa de transferencia en la Etapa 2

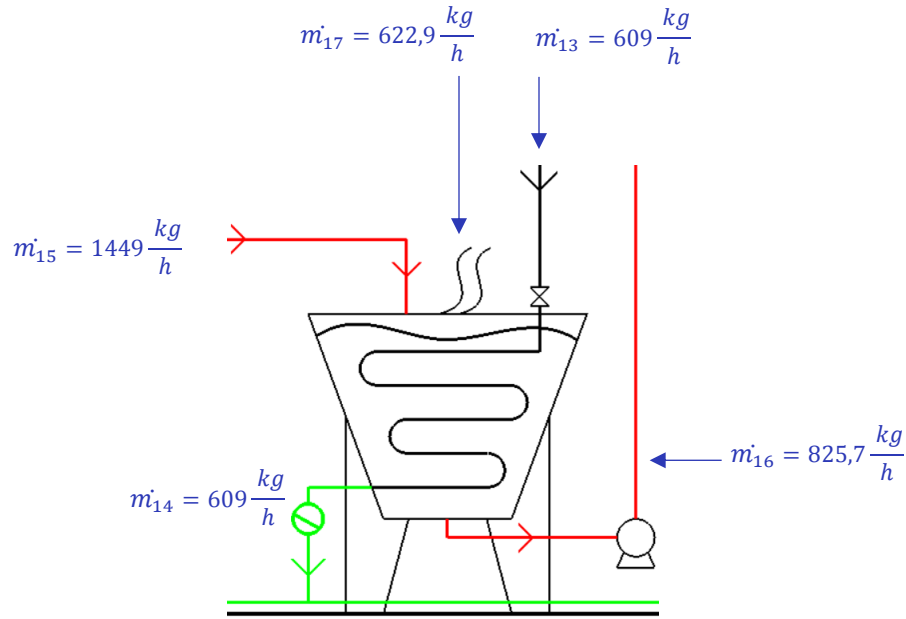


Figura 9. Proceso de evaporación.

donde: m_{13} corresponde a la cantidad de vapor que se emplea.

m_{14} cantidad de agua condensada.

m_{15} representa la cantidad de jugo de caña limpio que entra al evaporador.

m_{16} cantidad de jugo después de evaporar agua.

m_{17} agua evaporada en esta etapa.

Esta etapa del proceso es denominada evaporación, es en esta donde se eleva la concentración de $^{\circ}Bx$ de 17% a 60%; además el evaporador está abierto a la atmosfera, por lo cual la presión que actúa sobre la mezcla será la local de la región del Valle del Cauca, la cual aproximadamente es de 90 kPa, asimismo se toman las temperaturas de entrada y salida en el evaporador, basadas en la literatura [24], [31].

$$T_{Ent\ Evap} = 94\ ^{\circ}C$$

$$T_{Sal\ Evap} = 97\ ^{\circ}C$$

$$Mezcla_{M2} = Jugos_{DP} + Agua_{Macerado} + Agua_{Limpia} \quad \text{Ec. (45)}$$

$$Mezcla_{M2} = (683,82 + 25 + 739,7) \frac{kg}{h}$$

$$Mezcla_{M2} = 1448,52 \frac{kg}{h}$$

La $Mezcla_{M2}$ corresponde al jugo que entra al evaporador, ya en este gran parte del contenido de agua es extraído, pudiendo extraer hasta el 90% [17], por eso es indispensable conocer la cantidad de agua al iniciar el proceso y al culminarlo. La cantidad de agua que es calentada y evaporada en este proceso corresponde a la $Mezcla_{M3}$.

$$Agua_{Ini\ Evap} = \left(\frac{100\% - ^\circ Bx_{Ini}}{100\%} \right) (Mezcla_{M2}) \quad \text{Ec. (46)}$$

$$Agua_{Ini\ Evap} = Agua_{Ini\ Evap} = \left(\frac{100\% - 17\%}{100\%} \right) \left(1448,52 \frac{kg}{h} \right) = 1202,17 \frac{kg}{h}$$

$$Agua_{Fin\ Evap} = \left(\frac{100\% - ^\circ Bx_{Evap}}{100\%} \right) (Mezcla_{M2}) \quad \text{Ec. (47)}$$

$$Agua_{Fin\ Evap} = \left(\frac{100\% - 60\%}{100\%} \right) \left(1448,52 \frac{kg}{h} \right) = 579,36 \frac{kg}{h}$$

$$Mezcla_{M3} = Agua_{Ini\ Evap} - Agua_{Fin\ Evap} \quad \text{Ec. (48)}$$

$$Mezcla_{M3} = (1202,17 - 579,36) \frac{kg}{h} = 622,8 \frac{kg}{h}$$

Teniendo la cantidad de agua calentada y evaporada, es posible determinar la tasa de transferencia de calor en el proceso de evaporización.

$$\dot{Q}_2 = Mezcla_{M3} (H_{Sal\ Evap} - H_{Entra\ Evap}) \quad \text{Ec. (49)}$$

$$H_{Entra\ Evap} = h_{f@T_{Ent\ Evap}} = 393,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{Entra\ Evap} = h_{g@P_{Ambiente}} = 2670,31 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando los valores en la Ec.49:

$$\dot{Q}_2 = \left(622,8 \frac{kg}{h} \right) \left((2670,31 - 393,8) \frac{kJ}{kg} \right) \left(\frac{1\ h}{3600\ s} \right)$$

$$\dot{Q}_2 = 393,83 \frac{kJ}{s}$$

En la evaporación se tienen dos evaporadores de iguales características, por lo que el valor de \dot{Q}_2 representa la tasa de transferencia de calor total entre el jugo y el agua que es

evaporada en esta etapa; esta misma tasa se dará entre el jugo y el serpentín, la cual servirá para determinar el balance de masa, de energía y determinar la eficiencia empleando el software EES.

3.2.3.3. Tasa de transferencia en la Etapa 3

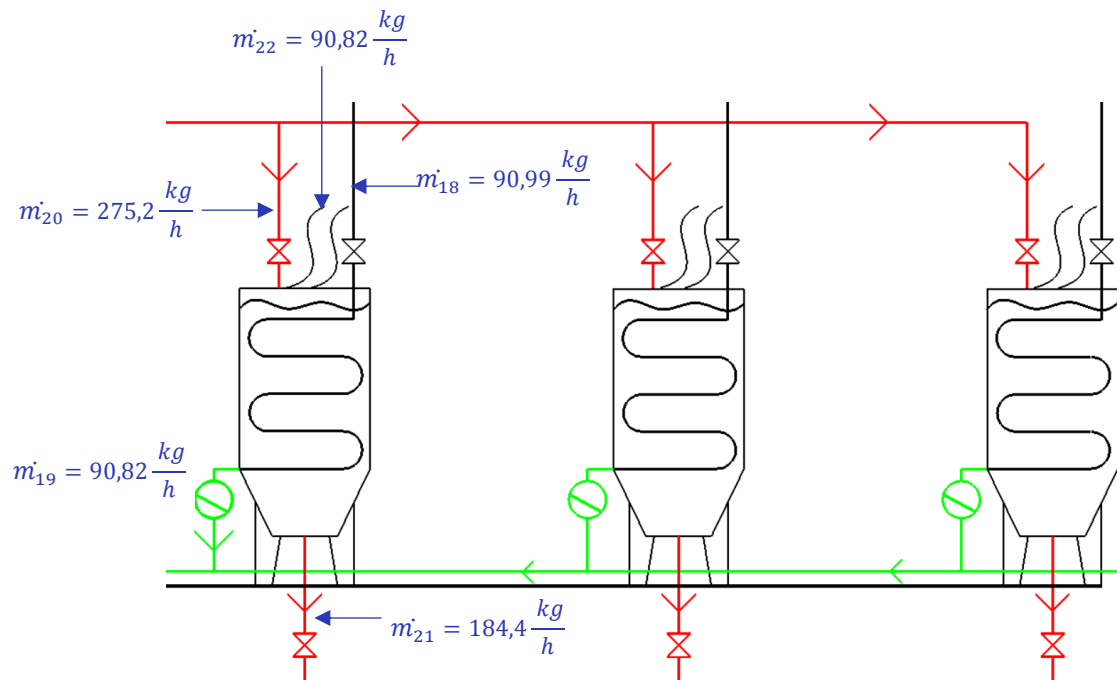


Figura 10. Proceso de tachos.

donde: m_{18} corresponde a la cantidad de vapor que se emplea en un solo tacho.

m_{19} cantidad de agua condensada.

m_{20} representa la cantidad de jugo que ingresa al primer tacho.

m_{21} cantidad de producto final en un solo tacho.

m_{22} agua evaporada en un solo tacho.

Esta es la etapa final del proceso, también es llamada tachos, aquí se eleva la concentración de $^{\circ}Bx$ de 60% a 93%, obteniendo así los $^{\circ}Bx$ de la panela, estos tachos están abiertos a

la atmosfera; en este proceso los valores de las temperaturas de entrada y salida en los tachos son tomados de la literatura [24], [31].

$$T_{Ent\ Tacho} = 97\ ^\circ C$$

$$T_{Sal\ Tacho} = 120\ ^\circ C$$

$$Mezcla_{M4} = Mezcla_{M2} - Mezcla_{M3} \quad \text{Ec. (50)}$$

$$Mezcla_{M4} = (1448,52 - 622,8) \frac{kg}{h}$$

$$Mezcla_{M4} = 825,72 \frac{kg}{h}$$

Se procede a calcular la cantidad de agua que es calentada y evaporada en este proceso final $Mezcla_{M5}$, al igual que en la evaporación se debe determinar la cantidad de agua presente al iniciar y terminar este proceso.

$$Agua_{Ini\ Tacho} = \left(\frac{100\% - ^\circ Bx_{Evap}}{100\%} \right) (Mezcla_{M4}) \quad \text{Ec. (51)}$$

$$Agua_{Ini\ Tacho} = \left(\frac{100\% - 60\%}{100\%} \right) \left(825,72 \frac{kg}{h} \right) = 330,28 \frac{kg}{h}$$

$$Agua_{Fin\ Tacho} = \left(\frac{100\% - ^\circ Bx_{Fin}}{100} \right) (Mezcla_{M4}) \quad \text{Ec. (52)}$$

$$Agua_{Fin\ Tacho} = \left(\frac{100\% - 93\%}{100\%} \right) \left(825,72 \frac{kg}{h} \right) = 57,8 \frac{kg}{h}$$

$$Mezcla_{M5} = Agua_{Ini\ Tacho} - Agua_{Fin\ Tacho} \quad \text{Ec. (53)}$$

$$Mezcla_{M5} = (330,28 - 57,8) \frac{kg}{h} = 272,47 \frac{kg}{h}$$

Teniendo presente la cantidad de agua calentada y evaporada total en el proceso de tachos, es posible determinar la tasa de transferencia de calor en este proceso.

$$\dot{Q}_3 = Mezcla_{M5} (H_{Sal\ Tacho} - H_{Entra\ Tacho}) \quad \text{Ec. (54)}$$

$$H_{Entra\ Tacho} = h_{f@T_{Ent\ Tacho}} = 393,8 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{Entra\ Tacho} = h_{g@P\ Ambiente} = 2670,31 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando los valores en la Ec. 54, se obtiene que:

$$\dot{Q}_3 = \left(272,47 \frac{kg}{h}\right) \left((2670,31 - 393,8) \frac{kJ}{kg}\right) \left(\frac{1 h}{3600 s}\right)$$

$$\dot{Q}_3 = 172,3 \frac{kJ}{s}$$

El valor representa la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo entre el jugo y el agua que es evaporada en el proceso final de elaboración de la panela, teniendo en cuenta que este valor es la magnitud que se da en el conjunto para los 3 tachos; esta misma tasa se dará entre el jugo y el serpentín, este valor será empleado para determinar el balance de masa, de energía y determinar la eficiencia mediante el software EES.

$$Potencia = \frac{Energia}{tiempo} \quad \text{Ec. (55)}$$

La potencia representa la cantidad de trabajo por unidad de tiempo [41], esta puede asociarse a la velocidad de un cambio de la energía dentro de un sistema; empleando la Ec. 55 se determina la potencia requerida para llevar los diferentes procesos nombrados de un estado inicial a uno final.

3.2.4 Cálculos empleando el software EES

Ya teniendo plenamente identificados los procesos en los cuales se suministra vapor para elevar la temperatura de la mezcla y aumentar la concentración de oBx de la misma, para complementar el análisis termodinámico se realizará el balance de masa, el balance de energía y se calcula la eficiencia para los procesos ya mencionados, para estos tres últimos cálculos se emplea el software EES.

Se asumirá una pérdida de presión en la red de vapor del 80 % la cual estaría distribuida de la siguiente manera; en la etapa de tachos, al ser el proceso más cercano a la generación de vapor y al estar tan cercanos los tachos unos de otros, se analiza un tacho de por medio y se pretende que el siguiente posea las mismas características, es decir se tendría una pérdida del 5% cada dos tachos; luego se presenta una pérdida del 20 % hasta llegar al proceso de evaporación, después se encuentra el proceso de limpieza y calentamiento y luego está la etapa de calentamiento de agua de macerado, en cada uno de ellos la presión cae un 20 % más, la última etapa mencionada, no requiere un valor energético alto ya que

únicamente se pretende precalentar el agua; asimismo la presión atmosférica se de 90 kPa la cual corresponde a la región del Valle del Cauca. Se propone emplear 3 tachos para procesar 1238,55 kg, es decir cada uno de estos procesaría alrededor de 412,85 kg según lo planteado. La temperatura promedio cedida en los intercambiadores es aproximadamente de 50 °C para el proyecto.

Los principales resultados obtenidos empleando el software EES, son consignados en las tablas 1, 2, 3 y 4, estos permiten evidenciar en que parte del proceso se presenta mayor demanda energética, es decir en que instancia del proceso se necesita mayor cantidad de energía para calentar o evaporar el agua presente en el jugo de caña, así como la respectiva eficiencia. Se estima que el proceso típicamente por etapa dura en promedio entre una y dos horas; para este caso se asume un tiempo promedio de 1,5 h [42].

Parametro	Valor
Masa inicial de jugo de caña 17 °Bx	2173,5 kg
Masa fina de miel 60 °Bx	1238,55 kg
Masa de agua a evaporar	934.95 kg
Consumo de vapor	913,5 kg
Energía total	2,33E6 kJ
Potencia	431 kW
Eficiencia	69,68 %

Tabla 1. Parámetros determinados en el proceso de evaporación.

Parametro	Valor
Masa inicial de miel 60 °Bx	1238,55 kg
Masa fina de miel 93 °Bx	829,8 kg
Masa de agua a evaporar	408,75 kg
Consumo de vapor	409,45 kg
Energía total	1,02E6 kJ
Potencia	188,22 kW
Eficiencia	72,49 %

Tabla 2. Parámetros determinados en el proceso de tachos.

Parametro	Valor
Masa inicial de jugo de caña 17 °Bx	2250 kg
Consumo de vapor	228,39 kg
Energía total	550,26E3 kJ
Potencia	101,9 kW
Eficiencia	58,94 %

Tabla 3. Parámetros determinados en el proceso de calentamiento y limpieza.

Parametro	Valor
Masa inicial de agua a calentar	37,5 kg
Consumo de vapor	2,01 kg
Energía total	4,71E3 kJ
Potencia	0,8715 kW
Eficiencia	32,35 %

Tabla 4. Parámetros determinados en el proceso calentamiento de agua para macerado.

En la figura 11 se encuentran representados los diferentes puntos que se tienen en cuenta para realizar el balance de masa, de energía y calcular la eficiencia; de este modo se precisa a que parte del proceso corresponden los valores anteriormente nombrados; en el anexo 1 se encuentra la programación empleada en el software.

3.2.5 Comparación de los resultados con la literatura

La producción de panela según la cantidad de caña molida que son $10 \frac{t}{dia}$, corresponde a un valor de 125 kg/h, este valor comparado con la literatura se encuentra dentro de lo que se denomina mediana producción y corresponde a un trapiche estándar, según el ministerio de agricultura y desarrollo social [6], [7].

El proceso de producción de panela posee un factor de rendimiento del 10%, es decir por cada 100 kg de caña que se procesa, se obtienen 10 kg de panela; este porcentaje está acorde con la literatura, según esta, la conversión de caña a panela según la literatura oscila aproximadamente entre un 8 % y un 10 % [6].

Los procesos que se evidencian al interior de la frontera plateada desde la molienda hasta la obtención de la panela se presentan en la gran mayoría de trapiches de mediana escala instalados en Colombia [17], [25], [31].

Según la literatura los procesos más críticos en la elaboración de panela son aquellos donde se deba suministrar calor suficiente para lograr un cambio de fase; esto se pudo comprobar durante el desarrollo del proyecto, se evidencio que el proceso de evaporación presenta el mayor suministro de calor para lograr su cambio de fase [16].

Los resultados obtenidos empleando el software EES, corroboran las etapas en las cuales se ha evidenciado mayor demanda energética según la literatura, la cual se centra principalmente el proceso de evaporación, seguida del proceso de tachos, limpieza y por último el calentamiento de agua de macerado [16].

La extracción de jugo que se obtuvo para el trabajo es del 33,65 %, este valor puede variar significativamente según la potencia de los molinos de extracción y la apertura de las masas de extracción, en este caso se tiene una extracción por debajo de los valores típicos, estos se encuentran entre 45 % y 67 % [6].

La eficiencia en los intercambiadores de calor abiertos a la atmosfera, en las etapas de calentamiento y limpieza, evaporación y tachos, es aproximadamente del 55 % [41], y las eficiencias que se alcanzan en el desarrollo del proyecto en estas etapas, son respectivamente 59%, 70%, 72%, y en el calentamiento de agua de macerado 32%; los valores de las eficiencias en los tres primeros procesos nombrados, presentan valores elevados comparados con los que se encuentran en la literatura, debido a que no se tienen

en cuenta diferentes aspectos que alteran el rendimiento del proceso, como lo pueden ser las fugas, condiciones atmosféricas, deterioro de los equipos, materiales, entre otras; otro aspecto muy importante que afecta significativamente consiste en determinar las diferentes pérdidas que se pueden presentar entorno al proceso.

En la etapa de evaporación, según la literatura se extrae alrededor del 90% de agua presente en la mezcla [17], en el proyecto se obtuvo una evaporación del 52%, este valor está por debajo del valor típico que se alcanza en esta fase, lo que evidencia que se deben realizar algunas mejoras, cambios o modificaciones que involucren diseño en este proceso.

3.2.6 Identificación de las mejoras, sugerencias o recomendaciones

El emplear evaporadores de múltiples efectos contribuye a que se aproveche en mayor proporción la energía presente en el vapor, además el vapor de agua que es generado es recuperado, lo que ayudaría a reducir el porcentaje de agua que se debe utilizar al interior del proceso. No obstante, en las etapas de evaporación y tachos se generan gran cantidad de vapor de agua y este, simplemente es liberado al ambiente, ocasionando un ambiente húmedo y en algunos casos acelerando la corrosión de los equipos; este tipo de energía que se genera y se disipa en los intercambiadores se podría utilizar en el precalentamiento de los jugos o en el secado del bagazo, esto contribuirá en la disminución del consumo de combustible y en los costos de producción [31].

Un aspecto importante al momento de extraer el jugo de caña está ligado a la disposición de los rodillos de los molinos, ya que estos deben contar con la apertura indicada para extraer a máxima cantidad de jugo y asegurar que el residuo o bagazo que será empleado en el generador de vapor posee la menor cantidad de humedad posible, debido a este aspecto, gran cantidad de trapiches emplean bagazo con gran cantidad de humedad, por lo que se ven en la obligación de suministrar otro tipo de combustible como la leña o llantas usadas ocasionando mayor contaminación y disminuyendo la eficiencia.

En la generación de vapor en el generador de vapor, se puede obtener un aumento significativo de su eficiencia, esto se alcanzaría implementado un óptimo plan de mantenimiento, además el instalar un sistema de recuperación de calor desprendido en los gases de escape en la chimenea, este ayudaría a precalentar el aire que es suministrado al

generador; disminuyendo el consumo de combustible y el suministro de aire, igualmente los generadores pueden presentar bajas eficiencias debido a factores como incrustaciones, corrosión, arrastre, depósitos, entre otros [42].

Existen entidades que brindan la posibilidad de implementar la tecnología de vapor en sus procesos de producción panelera, como lo son FEDEPANELA, IICA, entre otras, las cuales brindan el acompañamiento y la capacitación necesaria para proporcionar mejoras al interior de los trapiches, los proyectos liderados por estas entidades buscan optimizar el proceso de combustión de las hornillas empleando sistemas de dosificación de bagazo y recuperación de calor residual, esperando aumentar la producción alrededor de un 30 % y aumentar la eficiencia de sus hornillas en un promedio de 8 % [15].

En cada etapa que se presenta un cambio de fase, como lo son evaporación y tachos, se podrían instalar mecanismos de recuperación de vapor de agua, el cual es generado debido a la ebullición de la mezcla, donde se evapora un porcentaje del contenido de agua debido a que es la sustancia que posee menor punto de ebullición en la mezcla; este podría captarse y ser condensado, contribuyendo a reducir el consumo de agua que se suministra al circuito, además esta posee alto valor energético lo que hace que disminuya el consumo de combustible al momento de ingresar al generador de vapor.

Los balances de energía son herramientas necesarias para poder establecer la cantidad de energía utilizada en cualquier proceso; sin embargo, no indica el porcentaje que se está aprovechando de la energía presente; es por esto que el presente trabajo sirve como referencia para realizar un balance de exergía en futuras investigaciones y establecer donde se aprovecha o destruye la mayor cantidad de energía; por tal motivo un balance exergético indicaría que tan eficiente es un proceso en relación a la energía que dispone y que utiliza.

4. CONCLUSIONES

El proyecto tuvo por objetivo general realizar el análisis energético teórico de los procesos de vapor en un trapiche panelero de mediana escala, empleando un análisis termodinámico; en este capítulo se encuentran las conclusiones con las cuales culmina el proyecto.

Realizar un análisis energético teórico al interior de la frontera comprendida entre la molienda y la obtención de la panela en un trapiche estándar, haciendo énfasis en los procesos que involucran vapor; permite identificar los procesos y equipos en los cuales se requiere mayor suministro de energía, las estrategias de ahorro energético que se pueden plantear con base a los resultados obtenidos se centran en la formación adecuada del personal, diseño apropiado de los equipos o componentes, brindar un oportuno mantenimiento a los equipos y maquinaria, aplicar las BPA y BPM, además de un adecuado direccionamiento en diversos niveles de la organización como lo son operacionales, técnicas, ambientales, sociales, comerciales, legislativas, entre otras.

Emplear una correcta gestión energética al interior del trapiche responde a la necesidad de disminuir la demanda energética, con el objetivo de que la organización alcance unos objetivos que se ha planteado en términos de eficiencia, ahorro, sostenibilidad y competitividad en el mercado.

Utilizar exclusivamente un combustible para la generación de vapor, el cual es el bagazo, contribuye a mejorar y preservar el medio ambiente, ya que se minimiza la emisión de gases nocivos para la salud, debido a que no se emplean combustibles secundarios como llantas, madera, leña, entre otros, para alcanzar la producción estimada, los cuales generan gran cantidad de contaminación.

Emplear la tecnología del vapor en el proceso productivo de la panela, requiere de un compromiso constante, además de una inversión inicial de dinero, de la capacitación y concientización de todo el personal involucrado en la producción de panela, estos factores son cruciales para obtener unos resultados constantes y no solo mejoras momentáneas, igualmente en cada mejora que se realiza, se estaría optimizando cada vez más los diferentes procesos, se está modernizando; es decir se estaría contribuyendo a monitorear

los principales parámetros de funcionamiento con la finalidad de tomar las medidas necesarias en el menor tiempo.

Como lo indica la literatura, los intercambiadores son los componentes en los cuales se presentan mayores pérdidas energéticas; como quedo evidenciado, el proceso de evaporación es donde se demanda mayor cantidad de energía, lo cual indica que pueden existir factores que se pueden mejorar para disminuir costos en la organización, es decir, se podría replantear el diseño del intercambiador teniendo en cuenta aspectos como materiales, geometría y la cantidad de materia a procesar, esto con la intención de impactar directamente en el consumo de combustible y lograrlo disminuir. Las acciones que se toman para modificar, cambiar, tecnificar un proceso, equipo o componente, pueden ser implantadas día tras día, en cualquier momento, basta con contar con una iniciativa y ser perseverante para lograr un verdadero cambio que se verá reflejado en el ámbito económico y social.

Determinar la cantidad de energía que se demanda en cada proceso, es una aproximación a la cual se llegó en el proyecto, ya que se trabaja con hipótesis o basándose en la literatura; intentando tener la mayor aproximación a la realidad, debido a que no se tienen en cuenta factores cruciales como perdidas, fugas, material aislante, trayectorias, entre otros; que hacen que los valores obtenidos varíen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VELÁSQUEZ ARREDONDO, H. I., CHEJNE JANNA, F., & AGUDELO SANTAMARÍA, A. F. (2004). Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia. 2.
- [2] (2012). *Estudio del mercado de la panela en Colombia y el mundo*.
- [3] GORDILLO ARIZA, G. (2001). *Fundamentos teóricos y nuevos sistemas de deshidratación de jugos en la agroindustria panelera*. Villavicencio: Corpoica.
- [4] ZABALA PATIÑO, J. M., & BONILLA PUERTO, J. R. (2010). Desarrollo de un modelo de cálculo de transferencia de calor para intercambiadores (pailas) pirotubulares de la industria panelera. Bucaramanga, Colombia.
- [5] BUJAK, J. (2008). Energy savings and heat efficiency in the paper industry: A case study of a corrugated board machine. *ScienceDirect*, 1597-1608.
- [6] LA PANELA. (2013). Citada el 21 de octubre de 2016, de http://www.trapichepanelerogualanday.com/LA_PANELA_PASOS_EN_LA_PREPARACION.pdf
- [7] ARIAS LEIVA, A. F., TAMARA MATERA, L. V., & ARVELAEZ SOTO, F. (2006). El sector panelero Colombiano. *Ministeria de Agricultura y Desarrollo Rural*, 1-6.
- [8] CENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2009). Termodinámica Sexta Edición. En Y. A. CENGEL, & M. A. BOLES, *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- [9] Norma Internacional ISO 50001. (15 de Junio de 2011). *Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso*.
- [10] BETANCUR MESA, S. (s.f.). *e-URE*. (F. CHEJNE JANNA, & K. SÁNCHEZ, Edits.) Citada el 14 de Noviembre de 2015, de <http://www.si3ea.gov.co/Eure/5/inicio.html>

- [11] BOHÓRQUEZ GUZMÁN, R. D. (2013). Auditoría Energética al Circuito de Vapor y Condensado de una Planta de Elaboración de Café Liofilizado. *TESIS DE GRADO*. GUAYAQUIL, ECUADOR.
- [12] CASTELLÓN CERÓN, L. I., & MADARIAGA GÓMEZ, N. (2012). Diseño de una estrategia de uso racional y eficiente de energía en una planta productora de harina. 6-8.
- [13] Manual eficiencia energética para MYPES. (2010). El Salvador. Obtenido de Centro nacional de producción mas limpia: www.cnpml.org.sv
- [14] SENA. (2010). *Tecnología a vapor*. Citada el 16 de Diciembre de 2016, de http://mesasectorialdepanela.blogspot.com.co/2010_04_01_archive.html
- [15] *Optimizaciòn del proceso de combustión de hornillas paneleras en el departamento de Cundinamarca a través de la implementación de un sistema de dosificación de bagazo y recuperación de calor residual*. (Noviembre de 2012). Citada el 20 de Febrero de 2016, de <http://energiayambienteandina.net/>
- [16] LLANÉS MANCILLA, R. D., CARRILLO MOJICA, N. H., CRIALES ROMERO, Á. L., & GUERRERO USEDA, C. J. (s.f.). Características tecnológicas de las industrias paneleras en la región del Gualivá. 10-13.
- [17] BOLAÑOS RIVERA, W., & LINARES LEGARDA, R. (2006). Instrumentación y control en el proceso productivo de la panela. 2-3.
- [18] BHATT, M. S. (2000). Energy audit case studies I - steam systems. *Science Direct*, 285-296.
- [19] MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. (2004). *Resolución número 2546 DE 2004*, 1-11.
- [20] UBAQUE GONZÁLEZ, L. L. (2013). Gestión en la producción panelera, municipio de Villeta, Cundinamarca. BOGOTA.
- [21] MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. (17 de Marzo de 2006). Resolución Número 779 de 2006. Bogotá, Colombia.

- [22] GONZALO RODRIGUEZ, H. G., ROA DIAZ, Z., & SANTACOLOMA, P. (2004). *Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina*. ROMA.
- [23] CABALLERO, Y. (s.f.). *Producción de panela*. Citada el 5 de Junio de 2017, de <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/prodar-panela-vapor.htm>
- [24] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL; PROGRAMA NACIONAL DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA PRONATTA. (2002). *Capacitación en la obtención de nuevos productos derivados de la caña y el manejo adecuado de la agroindustria panelera, municipio de Mocoa*. MOCOA.
- [25] MONTOYA G., C. F., & GIRALDO P., P. A. (2009). *Propuesta de diseño de planta de procesamiento de caña para la elaboración de panela Yolombo – Antioquia*. MEDELLIN.
- [26] GARCÍA, A. J. (2009). *Caracterización energética para el sistema de vapor de la empresa Colombina S.A usando el modelo de gestión integral de la energía*. Pereira.
- [27] SALGADO, A. A. (2005). *Formulación de un plan de gestión energética para la caracterización de la generación y distribución del vapor. Compañía Nacional de Levaduras Levapan S.A Planta Tulua*. Pereira.
- [28] *Proceso de elaboración*. (19 de Mayo de 2009). Citada el 15 de Noviembre de 2016, de Panela la Tobiana: <http://www.panela-latobiana.com/Proceso%20productivo.html>
- [29] PÉREZ, M. A. (2014). *Procesos de fabricación de panela y su aplicación a proyectos de automatización para el caso Colombiano*. Bogotá.
- [30] *Extracción de jugo de caña*. (25 de Mayo de 2009). Citado el 9 de Agosto de 2017, de <http://industrializacionjugocana.blogspot.es/1243282191/extraccion-de-jugo-ca-a/>
- [31] OSORIO CADAVID, G. (2007). *Buenas prácticas agrícolas [BPA] y buenas prácticas de manufactura [BPM] en la producción de caña y panela*. Citada el 13 de Septiembre de 2017, de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1525s/a1525s05.pdf>

- [32] RIVERA ALFARO, D., & CHAVES SOLERA, M. A. (Septiembre de 2003). Determinación de los Contenidos de Materia Extraña en las Entregas Comerciales de Caña de Azúcar (*Saccharum spp*) en Hacienda Juan Viñas S.A., Costa Rica. 42-44. Cartago, Costa Rica.
- [33] MATHIER, D., SELEME, P., BRAGACHINI, M., SÁNCHEZ, F., & MÉNDEZ, J. (2013). La caña de azúcar como cultivo energético. Argentina.
- [34] Moinco. (s.f.). *Generador de vapor*. Citado el 3 de Junio de 2017, de http://www.moinco.com.ar/catalogo_moinco_web.pdf
- [35] CASTRO MORA, J. (2002). *Operación y mantenimiento de calderas*. Bogotá.
- [36] CAMBRANES, Y. A. (2004). *Balance de energía y exergía para el sistema de calentamiento de jugo en un ingenio de azúcar*. Guatemala.
- [37] HOLMAN, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. Madrid, Aravaca, España: Mc-Graw-Hill.
- [38] *Tablas técnicas del acero inoxidable*. (20 de Febrero de 2018). Obtenido de Irestal Group: <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>
- [39] *Tabla de calibres*. (20 de Febrero de 2018). Obtenido de AHMSA: <http://www.mejorconacero.com/tabla-de-calibres/>
- [40] RESTREPO, Á., FLÓREZ, L. C., & TIBAQUIRÁ, J. E. (2017). Diseño, simulación y construcción de un serpentín evaporador para la industria panelera a baja escala en Colombia. *Ingeniería Mecánica Vol. 20 No. 2*, 51-57.
- [41] GARCÍA, H., PEÑA, A., LOPEZ, R., DURAN, E., & OLVERA, G. (2010). *Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela*.
- [42] DOMÍNGUEZ, J., CID, J., UCEDA, J., GARRIDO, P., LAHOZ, J., & ALMEIDA, J. (2012). *Calderas industriales eficientes*. España.
- [43] LÓPEZ ZARAZA. R. A. (2016). *Evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de evaporación de múltiple efecto en los procesos productivos de la panela*. Bogotá.

ANEXO

A continuación, en el anexo 1 se encuentra la programación que se empleó en el software EES, esta se utilizó para la realización del análisis termodinámico (balance de masa, balance de energía y cálculo de la eficiencia), en los componentes o equipo que emplean vapor.

Anexo 1. Programación software EES.

{PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL BALANCE ENERGÉTICO DE LOS PROCESOS QUE EMPLEAN VAPOR EN UN TRAPICHE PANELERO}

Cap=10000 [kg]
Aprovechamineto= 10 [%]
Jornada=8 [h]
Porcentaje_Fibra= 16 [%]
Hum_Final_Panela=7 [%]
Perdidas_Total=7 [%]
FE=34,5 [(Lb*vapor/h)/BHP]

PC_Superior=3100 [kCal/kg] {Poder calorífico}
Macerado_Recuperado=50 [%] {Porcentaje extracción en el macerado}

{GENERADOR DE VAPOR}

P_Trabajo_Caldera=113,78*Convert (psi;Kpa)
T_Entrada_Caldera=90 [°C]

{GRADOS BRIX}

Bx_Ini=17 [%]
Bx_Evap=60 [%]
Bx_Fin=93 [%]

{MEZCLA}

T_Ent_Calentador=35 [°C]
T_Sal_Calentador=94 [°C]

T_Ent_Evap=94 [°C]
T_Sal_Evap=97 [°C]

T_Ent_Tacho=94 [°C]
T_Sal_Tacho=120 [°C]

P_Ent=90 [kPa]
P_Sal=P_Ent

X_Max=1
X_Min=0

{CALENTAMIENTO AGUA MACERADO}

P_1=22,75*Convert(psi;kPa)
P_2=P_1
P_Ambiente=90 [kPa]
P_7=P_Ambiente
P_8=P_Ambiente
T_Cedida_Macerado=30 [°C]
T_Ambiente=20 [°C]

{CALENTAMIENTO Y LIMPIEZA (2 intercambiadores de iguales características)}

P_5=45,51*Convert(psi;kPa)
P_5=P_6
T_Cedida_Calentamiento=59 [°C]

{EVAPORADOR}

P_13=68,26*Convert(psi;kPa)
P_14=P_13
P_15=P_Ambiente
P_15=P_16
P_15=P_17
T_Cedida_Evaporador=50 [°C]
T_15=T_Ent_Evap
T_16=T_Sal_Evap

{TACHO 1}

P_18=108,209*Convert(psi;kPa)
P_19=P_18
P_20=P_Ambiente
P_20=P_21
P_20=P_22
T_Cedida_Tacho_1=50 [°C]
T_20=T_Ent_Tacho
T_21=T_Sal_Tacho

{TACHO 2}

P_23=102,4*Convert(psi;kPa)
P_24=P_23
P_25=P_Ambiente
P_25=P_26
P_25=P_27
T_Cedida_Tacho_2=50 [°C]
T_25=T_Ent_Tacho
T_26=T_Sal_Tacho

{TACHO 3}

P_28=96,71*Convert(psi;kPa)
P_29=P_28
P_30=P_Ambiente
P_31=P_30
P_32=P_30
T_Cedida_Tacho_3=50 [°C]
T_30=T_Ent_Tacho
T_31=T_Sal_Tacho

{----- _____ -----}

$Prod_Panela = (Cap * (Aprovechaminto / 100)) / Jornada$

"Molienda de caña"

$Mol_Caña = Cap / Jornada$

"Contenido total de jugo en la caña"

$Porcentaje_Ext_Jugo = (100 - Porcentaje_Fibra) / 100$

$Cont_Jugo_Caña = (Mol_Caña) * Porcentaje_Ext_Jugo$

"Sacarosa procesada"

$Sacarosa_Sac = (Bx_Fin / 100) * Prod_Panela$

$Agua_Sac = (Hum_Final_Panela / 100) * Prod_Panela$

"Jugos procesados después de perdidas"

$Jugos_DP = Sacarosa_Sac / (Bx_Ini / 100)$

"Jugos procesados antes de perdidas" {Alrededor de 7% en perdidas}

$Jugos_AP = Jugos_DP / ((100 - Perdidas_Total) / 100)$

"Jugos extraídos en la molienda inicial"

$Jugos_M1 = Mol_Caña * Extraccion$

"Jugos extraídos en el macerado"

$Jugos_M2 = (Macerado_Recuperado / 100[\%]) * (Cont_Jugo_Caña - Jugos_M1)$

"Jugos procesados antes de perdidas"

$Jugos_AP = Jugos_M1 + Jugos_M2$

"Porcentaje de extracción luego de macerado"

$Ext_Macerado = Jugos_AP / Mol_Caña$

"Bagazo quemado"

$Bagazo = Mol_Caña - Jugos_AP$

"Potencia entregada por el bagazo"

$P_Calorico = PC_Superior * Convert(kCal/kg; kJ/kg)$

$Pot_Bagazo = (P_Calorico * Bagazo * 0,67) * Convert(kJ/h; kW)$ {Se estima una eficiencia alrededor del 67%}

$Pot_Bagazo_BHP = Pot_Bagazo * (1[BHP] / 9,81[kW])$

"Potencia producido en el generador de vapor"

$Pot_Generador = Pot_Bagazo$

$Pot_Generador_BHP = Pot_Bagazo * (1[BHP] / 9,81[kW])$

"Vapor producido"

$Vap_Prod = Pot_Generador_BHP * FE$

"Factor de rendimiento"

$FR = Prod_Panela / Mol_Caña$

"CÁLCULO DE LA TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR"

"CALENTAMIENTO Y LIMPIEZA" {en esta etapa se realiza aumento de la temperatura del jugo de caña}

$$\text{Mezcla_M1} = \text{Jugos_AP} + \text{Agua_Macerado} + \text{Agua_limpia}$$

"Agua de macerado"

$$\text{Agua_Macerado} = \text{Mol_Caña} * 0,02$$

"Agua limpia"

$$\text{Agua_limpia} = (\text{Mol_Caña} * 1,2) - (\text{Agua_Macerado} + \text{Jugos_AP})$$

"Calor específico"

$$C_p = (1 - (0,06 * (\text{Bx_Ini}/100))) * (\text{Convert}(\text{kCal/kg}^{\circ}\text{K}; \text{kJ/kg}^{\circ}\text{K}))$$

"Tasa de transferencia en el calentamiento y limpieza"

$$Q_dot_1 = \text{Mezcla_M1} * C_p * (\text{T_Sal_Calentador} - \text{T_Ent_Calentador}) * \text{Convert}(\text{kJ/h}; \text{kW}) \quad \{\text{Tasa de transferencia en el evaporador}\}$$

"EVAPORADOR" {En esta etapa se eleva la concentración de °Bx inicial hasta llegar a los Bx de evaporación}

$$\text{Mezcla_M2} = \text{Jugos_DP} + \text{Agua_Macerado} + \text{Agua_limpia}$$

$$\text{Agua_Ini_Evap} = (1 - (\text{Bx_Ini}/100[\%])) * \text{Mezcla_M2}$$

$$\text{Agua_Fin_Evap} = (1 - (\text{Bx_Evap}/100[\%])) * \text{Mezcla_M2}$$

$$\text{Mezcla_M3} = \text{Agua_Ini_Evap} - \text{Agua_Fin_Evap} \quad \{\text{Agua calentada y evaporada en la evaporización}\}$$

$$H_Entra_Evap = \text{Enthalpy}(\text{Water}; \text{T} = \text{T_Ent_Evap}; \text{P} = \text{P_Ent})$$

$$H_Sal_Evap = \text{Enthalpy}(\text{Water}; \text{X} = \text{X_Max}; \text{P} = \text{P_Sal})$$

$$Q_dot_2 = \text{Mezcla_M3} * (H_Sal_Evap - H_Entra_Evap) * \text{Convert}(\text{kJ/h}; \text{kW}) \quad \{\text{Tasa de transferencia en el evaporador}\}$$

"TACHOS (CONCENTRACIÓN FINAL DE LA MEZCLA)" {En esta última etapa se lleva a concentración de °Br de la etapa de evaporación a los °Br final}

$$\text{Mezcla_M4} = \text{Mezcla_M2} - \text{Mezcla_M3}$$

$$\text{Agua_Ini_Tacho} = (1 - (\text{Bx_Evap}/100[\%])) * \text{Mezcla_M4}$$

$$\text{Agua_Fin_Tacho} = (1 - (\text{Bx_Fin}/100[\%])) * \text{Mezcla_M4}$$

$$\text{Mezcla_M5} = \text{Agua_Ini_Tacho} - \text{Agua_Fin_Tacho} \quad \{\text{Agua calentada y evaporada en los tachos}\}$$

$$H_Entra_Tacho = \text{Enthalpy}(\text{Water}; \text{T} = \text{T_Ent_Tacho}; \text{P} = \text{P_Ent})$$

$$H_Sal_Tacho = \text{Enthalpy}(\text{Water}; \text{X} = \text{X_Max}; \text{P} = \text{P_Sal})$$

$$Q_dot_3 = \text{Mezcla_M5} * (H_Sal_Tacho - H_Entra_Tacho) * \text{Convert}(\text{kJ/h}; \text{kW}) \quad \{\text{Tasa de transferencia en la etapa de tachos}\}$$

"TASA DE TRANSFERENCIA TOTAL"

$$Q_dot_Total = Q_dot_1 + Q_dot_2 + Q_dot_3 + Q_dot_Mezcla_Macerado$$

{ANÁLISIS TERMODINAMICO DE CADA COMPONENTE}

"CALENTAMIENTO AGUA MACERADO"

$m_{\dot{4}} = \text{Agua_Macerado}$
 $T_1 = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P_1; X=X_{\text{Max}})$
 $T_2 = T_1 - T_{\text{Cedida_Macerado}}$
 $T_3 = T_{\text{Ambiente}}$
 $T_4 = T_3 + T_{\text{Cedida_Macerado}}$
 $H_1 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_1; P=P_1)$
 $H_2 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_2; X=X_{\text{Min}})$
 $H_3 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_3; X=X_{\text{Min}})$
 $H_4 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_4; X=X_{\text{Min}})$

"Balance de masa"

{Serpentín} $m_{\dot{1}} = m_{\dot{2}}$
{Mezcla} $m_{\dot{3}} = m_{\dot{4}}$

"Balance de energía"

{Serpentín} $m_{\dot{1}} H_1 = m_{\dot{2}} H_2 + Q_{\dot{\text{Macerado}}}$
{Mezcla} $m_{\dot{3}} H_3 + Q_{\dot{\text{Macerado}}} = m_{\dot{4}} H_4$
 $Q_{\dot{\text{Mezcla_Macerado}}} = Q_{\dot{\text{Macerado}}} \cdot \text{Convert}(\text{kJ/h}; \text{kW})$

"Eficiencia"

$n_{\text{Calentamiento_Macerado}} = (T_1 - T_2) / (T_1 - T_3)$

"CALENTAMIENTO Y LIMPIEZA" {Dos evaporadores, se analiza solo uno}

$m_{\dot{7}} = (\text{Mezcla_M1}) / 2$
 $T_5 = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P_5; X=X_{\text{Max}})$
 $T_6 = T_5 - T_{\text{Cedida_Calentamiento}}$
 $T_7 = (T_{\text{Ambiente}} + T_4) / 2$
 $T_8 = T_7 + T_{\text{Cedida_Calentamiento}}$
 $H_5 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; X=X_{\text{Max}}; P=P_5)$
 $H_6 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_6; X=X_{\text{Min}})$
 $H_7 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_7; X=X_{\text{Min}})$
 $H_8 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_8; X=X_{\text{Min}})$

"Balance de masa"

{Serpentín} $m_{\dot{5}} = m_{\dot{6}}$
{Mezcla} $m_{\dot{7}} = m_{\dot{8}}$

"Balance de energía"

{Serpentín} $m_{\dot{5}} H_5 = m_{\dot{6}} H_6 + ((Q_{\dot{1}}) / 2) \cdot \text{Convert}(\text{kW}; \text{kJ/h})$

"Eficiencia"

$n_{\text{Calentamiento_Limpieza}} = (T_5 - T_6) / (T_5 - T_7)$

"EVAPORADOR"

$m_{\dot{15}} = \text{Mezcla_M2}$
 $m_{\dot{17}} = \text{Mezcla_M3}$
 $T_{13} = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P_{13}; X=X_{\text{Max}})$
 $T_{14} = T_{13} - T_{\text{Cedida_Evaporador}}$
 $T_{17} = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P_{\text{Ambiente}}; X=X_{\text{Max}})$
 $H_{13} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; X=X_{\text{Max}}; P=P_{13})$
 $H_{14} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{14}; X=X_{\text{Min}})$
 $H_{15} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{15}; X=X_{\text{Min}})$

H_16=Enthalpy(Water;X=X_Max;P=P_16)

H_17=Enthalpy(Water;X=X_Max;P=P_17)

"Balance de masa"

{Serpentín} m_dot_13=m_dot_14

{Mezcla} m_dot_15=m_dot_16+m_dot_17

"Balance de energía"

{Serpentín} m_dot_13*H_13=m_dot_14*H_14+(Q_dot_2*Convert(kW;kJ/h))

E_Evaporador_ideal=Q_dot_2-E_sale+E_entra

E_Evaporador_real=Q_latente-E_sale-E_perdida+E_entra

Q_latente=Mezcla_M3*DELTAh_vap/3600

DELTAh_vap=Enthalpy_vaporization(Water;P=P_15)

E_entra=(m_dot_15*C_p_entra*50)/3600

C_p_entra=(1-(0,06*(Bx_Ini/100[%])))*(Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K))

E_sale=(m_dot_16*C_p_sale*50)/3600

C_p_sale=(1-(0,06*(Bx_Evap/100[%])))*(Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K))

E_perdida=((T_Sal_Evap-

T_Ent_Calentador)/((L_inox/(K_inox*A_inox))+(L_asbesto/(K_asbesto*A_asbesto))+(L_acero/(K_acero*A_acero))))/3600

A_inox= 13

A_asbesto=A_inox

A_acero=A_asbesto

L_inox=3/16*(Convert(in;m))

K_inox=14,9*1000

L_asbesto=(8*10)*(Convert(mm;m))

K_asbesto=0,046*1000

L_acero=3,42*(Convert(mm;m))

K_acero=48*1000

"Eficiencia"

n_Evaporador=(E_Evaporador_real/E_Evaporador_ideal)

"TACHO 1"

m_dot_20=(Mezcla_M4/3)

m_dot_22=(Mezcla_M5/3)

T_18=Temperature(Water;P=P_18;X=X_Max)

T_19=T_18-T_Cedida_Tacho_1

T_22=Temperature(Water;P=P_Ambiente;X=X_Max)

H_18=Enthalpy(Water;X=X_Max;P=P_18)

H_19=Enthalpy(Water;T=T_19;X=X_Min)

H_20=Enthalpy(Water;T=T_20;X=X_Min)

H_21=Enthalpy(Water;X=X_Max;P=P_21)

H_22=Enthalpy(Water;X=X_Max;P=P_22)

"Balance de masa"

{Serpentín} $m_{\dot{18}} = m_{\dot{19}}$
{Mezcla} $m_{\dot{20}} = m_{\dot{21}} + m_{\dot{22}}$

"Balance de energía"

{Serpentín} $m_{\dot{18}} H_{18} = m_{\dot{19}} H_{19} + (((Q_{\dot{3}})/3) * \text{Convert}(\text{kW}; \text{kJ/h}))$

$E_{\text{Tacho1_ideal}} = (Q_{\dot{3}})/3 - E_{\text{sale_Tacho1}} + E_{\text{entra_Tacho1}}$

$E_{\text{Tacho1_real}} = Q_{\text{latente_Tacho1}} - E_{\text{sale_Tacho1}} - E_{\text{perdida_Tacho1}} + E_{\text{entra_Tacho1}}$

$Q_{\text{latente_Tacho1}} = \text{Mezcla_M5}/3 * \text{DELTA}h_{\text{vap_Tacho1}}/3600$
 $\text{DELTA}h_{\text{vap_Tacho1}} = \text{Enthalpy_vaporization}(\text{Water}; P = P_{20})$

$E_{\text{entra_Tacho1}} = (m_{\dot{20}} * C_{p_entra_Tacho1} * 50)/3600$
 $C_{p_entra_Tacho1} = (1 - (0,06 * (Bx_{\text{Evap}}/100[\%]))) * (\text{Convert}(\text{kCal/kg}^{\circ}\text{K}; \text{kJ/kg}^{\circ}\text{K}))$

$E_{\text{sale_Tacho1}} = (m_{\dot{21}} * C_{p_sale_Tacho1} * 50)/3600$
 $C_{p_sale_Tacho1} = (1 - (0,06 * (Bx_{\text{Fin}}/100[\%]))) * (\text{Convert}(\text{kCal/kg}^{\circ}\text{K}; \text{kJ/kg}^{\circ}\text{K}))$

$E_{\text{perdida_Tacho1}} = ((T_{\text{Sal_Tacho}} - T_{\text{Ent_Calentador}}) / ((L1_{\text{inox}} / (K1_{\text{inox}} * A1_{\text{inox}})) + (L1_{\text{asbesto}} / (K1_{\text{asbesto}} * A1_{\text{asbesto}})) + (L1_{\text{acero}} / (K1_{\text{acero}} * A1_{\text{acero}})))) / 3600$

$A1_{\text{inox}} = 5$
 $A1_{\text{asbesto}} = A1_{\text{inox}}$
 $A1_{\text{acero}} = A1_{\text{asbesto}}$
 $L1_{\text{inox}} = 3/16 * (\text{Convert}(\text{in}; \text{m}))$
 $K1_{\text{inox}} = 14,9 * 1000$
 $L1_{\text{asbesto}} = (8 * 40) * (\text{Convert}(\text{mm}; \text{m}))$
 $K1_{\text{asbesto}} = 0,046 * 1000$
 $L1_{\text{acero}} = 3,42 * (\text{Convert}(\text{mm}; \text{m}))$
 $K1_{\text{acero}} = 48 * 1000$

"Eficiencia"

$n_{\text{Tacho1}} = (E_{\text{Tacho1_real}} / E_{\text{Tacho1_ideal}})$

"TACHO 2"

$m_{\dot{25}} = (\text{Mezcla_M4})/3$
 $m_{\dot{27}} = (\text{Mezcla_M5})/3$

$T_{23} = \text{Temperature}(\text{Water}; P = P_{23}; X = X_{\text{Max}})$
 $T_{24} = T_{23} - T_{\text{Cedida_Tacho_2}}$
 $T_{27} = \text{Temperature}(\text{Water}; P = P_{\text{Ambiente}}; X = X_{\text{Max}})$
 $H_{23} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; X = X_{\text{Max}}; P = P_{23})$
 $H_{24} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{24}; X = X_{\text{Min}})$
 $H_{25} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{25}; X = X_{\text{Min}})$
 $H_{26} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; X = X_{\text{Max}}; P = P_{26})$
 $H_{27} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; X = X_{\text{Max}}; P = P_{27})$

"Balance de masa"

{Serpentín} $m_{\dot{23}} = m_{\dot{24}}$
{Mezcla} $m_{\dot{25}} = m_{\dot{26}} + m_{\dot{27}}$

"Balance de energía"

{Serpentín} $m_{\dot{23}}H_{23}=m_{\dot{24}}H_{24}+(((Q_{\dot{3}})/3)*\text{Convert(kW;kJ/h)})$

$E_{\text{Tacho2_ideal}}=(Q_{\dot{3}})/3-E_{\text{sale_Tacho2}}+E_{\text{entra_Tacho2}}$

$E_{\text{Tacho2_real}}=Q_{\text{latente_Tacho2}}-E_{\text{sale_Tacho2}}-E_{\text{perdida_Tacho2}}+E_{\text{entra_Tacho2}}$

$Q_{\text{latente_Tacho2}}=\text{Mezcla_M5}/3*\text{DELTA}h_{\text{vap_Tacho2}}/3600$

$\text{DELTA}h_{\text{vap_Tacho2}}=\text{Enthalpy_vaporization}(\text{Water};P=P_{25})$

$E_{\text{entra_Tacho2}}=(m_{\dot{25}}*C_{p_entra_Tacho2}*50)/3600$

$C_{p_entra_Tacho2}=(1-(0,06*(Bx_{\text{Evap}}/100[\%])))*(\text{Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K)})$

$E_{\text{sale_Tacho2}}=(m_{\dot{26}}*C_{p_sale_Tacho2}*50)/3600$

$C_{p_sale_Tacho2}=(1-(0,06*(Bx_{\text{Fin}}/100[\%])))*(\text{Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K)})$

$E_{\text{perdida_Tacho2}}=((T_{\text{Sal_Tacho}}-T_{\text{Ent_Calentador}})/((L2_{\text{inox}}/(K2_{\text{inox}}*A2_{\text{inox}}))+(L2_{\text{asbesto}}/(K2_{\text{asbesto}}*A2_{\text{asbesto}}))+(L2_{\text{acero}}/(K2_{\text{acero}}*A2_{\text{acero}}))))/3600$

$A2_{\text{inox}}=5$

$A2_{\text{asbesto}}=A2_{\text{inox}}$

$A2_{\text{acero}}=A2_{\text{asbesto}}$

$L2_{\text{inox}}=3/16*(\text{Convert(in;m)})$

$K2_{\text{inox}}=14,9*1000$

$L2_{\text{asbesto}}=(8*40)*(\text{Convert(mm;m)})$

$K2_{\text{asbesto}}=0,046*1000$

$L2_{\text{acero}}=3,42*(\text{Convert(mm;m)})$

$K2_{\text{acero}}=48*1000$

"Eficiencia"

$n_{\text{Tacho2}}=(E_{\text{Tacho2_real}}/E_{\text{Tacho2_ideal}})$

"TACHO 3"

$m_{\dot{30}}=(\text{Mezcla_M4})/3$

$m_{\dot{32}}=(\text{Mezcla_M5})/3$

$T_{28}=\text{Temperature}(\text{Water};P=P_{28};X=X_{\text{Max}})$

$T_{29}=T_{28}-T_{\text{Cedida_Tacho_3}}$

$T_{32}=\text{Temperature}(\text{Water};P=P_{\text{Ambiente}};X=X_{\text{Max}})$

$H_{28}=\text{Enthalpy}(\text{Water};X=X_{\text{Max}};P=P_{28})$

$H_{29}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{29};X=X_{\text{Min}})$

$H_{30}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{30};X=X_{\text{Min}})$

$H_{31}=\text{Enthalpy}(\text{Water};X=X_{\text{Max}};P=P_{31})$

$H_{32}=\text{Enthalpy}(\text{Water};X=X_{\text{Max}};P=P_{32})$

"Balance de masa"

{Serpentín} $m_{\dot{28}}=m_{\dot{29}}$

{Mezcla} $m_{\dot{30}}=m_{\dot{31}}+m_{\dot{32}}$

"Balance de energía"

{Serpentín} $m_{\dot{28}}H_{28}=m_{\dot{29}}H_{29}+(((Q_{\dot{3}})/3)*\text{Convert(kW;kJ/h)})$

$E_{\text{Tacho3_ideal}}=(Q_{\dot{3}})/3-E_{\text{sale_Tacho3}}+E_{\text{entra_Tacho3}}$

$$E_Tacho3_real=Q_latente_Tacho3-E_sale_Tacho3-E_perdida_Tacho3+E_entra_Tacho3$$

$$Q_latente_Tacho3=Mezcla_M5/3*DELTA h_vap_Tacho3/3600$$

$$DELTA h_vap_Tacho3=Enthalpy_vaporization(Water;P=P_25)$$

$$E_entra_Tacho3=(m_dot_30*C_p_entra_Tacho3*50)/3600$$

$$C_p_entra_Tacho3=(1-(0,06*(Bx_Evap/100[\%])))*(Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K))$$

$$E_sale_Tacho3=(m_dot_31*C_p_sale_Tacho3*50)/3600$$

$$C_p_sale_Tacho3=(1-(0,06*(Bx_Fin/100[\%])))*(Convert(kCal/kg*K;kJ/kg*K))$$

$$E_perdida_Tacho3=((T_Sal_Tacho-T_Ent_Calentador)/((L3_inox/(K3_inox*A3_inox)))+(L3_asbesto/(K3_asbesto*A3_asbesto)))+(L3_acero/(K3_acero*A3_acero)))/3600$$

$$A3_inox= 5$$

$$A3_asbesto=A3_inox$$

$$A3_acero=A3_asbesto$$

$$L3_inox=3/16*(Convert(in;m))$$

$$K3_inox=14,9*1000$$

$$L3_asbesto=(8*40)*(Convert(mm;m))$$

$$K3_asbesto=0,046*1000$$

$$L3_acero=3,42*(Convert(mm;m))$$

$$K3_acero=48*1000$$

"Eficiencia"

$$n_Tacho3=(E_Tacho3_real/E_Tacho3_ideal)$$

"Eficiencia global etapa de tachos"

$$n_Global_Tacho=(n_Tacho1+n_Tacho2+n_Tacho3)/3$$